

Entwicklung und Erprobung mineralischer Injektionssuspensionen zur Sanierung von Grundleitungsnetzen

Abschlussbericht

Ausführende Stelle: RWTH Aachen
ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb
Mies-van-der-Rohe-Straße 1
52074 Aachen

Auftraggeber: Ministerium für Umwelt und Naturschutz,
Landwirtschaft und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV)
Schwannstraße 3
40476 Düsseldorf

Aachen, Feb. 2008

Univ. Prof. Dr.-Ing. Rainard Osebold

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Vorwort.....	1
1.2	Ausgangssituation.....	1
2	Motivation und Ziel	3
3	Sanierungsverfahren	5
3.1	Injektionsmaterialien.....	5
3.1.1	Reine Bentonitsuspensionen.....	7
3.1.2	Bentonit-Zementsuspensionen.....	8
3.1.3	Zusatzstoffe und Zusatzmittel.....	12
3.2	Verfahrenstechnik.....	13
3.3	Reinigung der sanierten Grundleitungen.....	15
3.4	Wiederverwertung der Injektionssuspensionen.....	15
4	Vorversuche	18
4.1	Rheologischen Untersuchungen.....	18
4.1.1	Einfluss der Mischtechnik.....	23
4.1.2	Rheologische Untersuchungen an reinen Bentonitsuspensionen.....	26
4.1.3	Rheologische Untersuchungen an Bentonit-Zementsuspensionen.....	30
4.2	Penetrationseigenschaften.....	38
4.2.1	Einfluss der Sanierungssuspension.....	38
4.2.2	Einfluss der Verfahrenstechnik.....	45
4.3	Dauerhaftigkeit der Injektionskörper.....	48
5	In situ nahe Erprobung	51
5.1	Einfluss ausgewählter Randbedingungen (Basisversuche).....	51
5.1.1	Einflussgröße Rohrmaterial.....	55
5.1.2	Einflussgröße Schadensart.....	60
5.1.3	Einflussgröße Rohrbettung.....	62
5.1.4	Einflussgröße Schwingungserzeugung.....	64

5.2	Erosionsstabilität der Abdichtungskörper	66
5.3	Erprobung der Verfahrenstechnik an in situ nahen Leitungsnetzen	67
5.3.1	Sanierung mit reiner Bentonitsuspension (Hauptversuch I)	69
5.3.2	Sanierung mit Bentonit-Zementsuspension (Hauptversuch II)	70
6	Zusammenfassung und Ausblick	72
7	Literatur	75

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Sanierung mit dem Flutungsverfahren	3
Abbildung 3-1: Anwendungsgrenzen im Lockergestein.....	6
Abbildung 3-2: Bindemittelleitung anhand der Körnungslinie.....	10
Abbildung 3-3: Schwingungserzeugung durch pulsierende Volumenverdrängung.....	13
Abbildung 3-4: Druckluft-Kugelvibrator Typ NCB	14
Abbildung 4-1: Randbedingungen der Sanierung.....	18
Abbildung 4-2: Fließkurven unterschiedlicher Flüssigkeitstypen	19
Abbildung 4-3: Marshtrichter-Versuch	20
Abbildung 4-4: Rotationsviskosimeter Viskomat NT	20
Abbildung 4-5: Messprinzip des Rotationsviskosimeters mit Paddel.....	21
Abbildung 4-6: Messprofil (links), qualitative Fließkurve (rechts).....	22
Abbildung 4-7: Suspensionsmischer SC - 05 - K (links) und SC - 50 - K (rechts)	23
Abbildung 4-8: Fließkurven bei unterschiedlichen Mischzeiten	24
Abbildung 4-9: Vergleich der Mischer SC – 05 - K und SC – 50 - K.....	25
Abbildung 4-10: Nicht ausreichend stabile Bentonitsuspension	26
Abbildung 4-11: Fließkurven eines 5 Minuten alten Ibeco CT bei unterschiedlicher Dosierung	27
Abbildung 4-12: Fließkurven eines 7 Tage alten Ibeco CT bei unterschiedlicher Dosierung	28
Abbildung 4-13: Fließkurven eines 28 Tage alten Ibeco CT bei unterschiedlicher Dosierung	28
Abbildung 4-14: Dynamische Fließmomente von Natriumbentonit in Abhängigkeit der Dosierung und der Lagerzeit	29
Abbildung 4-15: Dynamische Fließmomente von Calciumbentonit in Abhängigkeit der Dosierung und der Lagerzeit.....	30
Abbildung 4-16: Rheologische Untersuchungen an dem Fertigprodukt Drill-mix.....	31
Abbildung 4-17: Vergleich zur Vorgehensweise bei der Messwerterfassung	33
Abbildung 4-18: Einfluss der Zementsorte.....	34
Abbildung 4-19: Einfluss des Zementgehaltes.....	35

Abbildung 4-20: Einfluss des Zusatzstoffes Flugasche	36
Abbildung 4-21: Einfluss des Zusatzmittels Injektionshilfe	37
Abbildung 4-22: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Eindringverhaltens	38
Abbildung 4-23: Durchflussergebnisse der Natriumbentonit-Suspensionen.....	39
Abbildung 4-24: Durchflussergebnisse der Calciumbentonit-Suspension	40
Abbildung 4-25: Dichtheitsprüfung der Durchflussproben in grobem Normsand	41
Abbildung 4-26: Sieblinien der Prüfsande	42
Abbildung 4-27: Durchflussmessung verschiedener Zementsorten in Normsand fein (links) und Mauersand (rechts).....	43
Abbildung 4-28: Durchflussmessung verschiedener Zementgehalte in Normsand fein (links) und Mauersand (rechts).....	43
Abbildung 4-29: Durchflussmessung verschiedener Flugaschenanteile in Normsand fein (links) und Mauersand (rechts).....	44
Abbildung 4-30: Durchflussmessung verschiedener Injektionshilfeanteile in Normsand fein (links) und Mauersand (rechts).....	45
Abbildung 4-31: Durchflussversuche zum Einfluss verfahrenstechnischer Parameter	46
Abbildung 4-32: Durchflussmessergebnisse für verschiedene Vibrationsstärken bei einer Injektionsdruckhöhe von 1 m	47
Abbildung 4-33: Durchflussmessergebnisse für verschiedene Vibrationsstärken bei einer Injektionsdruckhöhe von 2 m	47
Abbildung 4-34: Druckfestigkeit der Injektionskörper.....	49
Abbildung 5-1: Versuchsaufbau der Basisversuchsreihen	52
Abbildung 5-2: Einbau der Rohrleitungsabschnitte.....	53
Abbildung 5-3: Versagensarten des Abdichtungskörpers.....	54
Abbildung 5-4: Versuchsaufbau: Einflussgröße Rohrmaterial (Kunststoff links, Steinzeug rechts)	55
Abbildung 5-5: Materialverbrauch für die Sanierung einer Steinzeugmuffenverbindung mit einer reinen Bentonitsuspension	56
Abbildung 5-6: Wasserverluste während der Belastungsprüfung	57
Abbildung 5-7: Materialverbrauch für die Sanierung einer Kunststoffmuffenverbindung mit einer reinen Bentonitsuspension	58
Abbildung 5-8: Injektionskörper bei einer Steinzeugmuffenverbindung.....	59

Abbildung 5-9: Materialverbrauch für die Sanierung einer Risschadstelle mit einer reinen Bentonitsuspension	60
Abbildung 5-10: Abdichtungskörper einer reinen Bentonitsuspension mit Hohlraum	61
Abbildung 5-11: Materialverbrauch für die Sanierung einer Risschadstelle mit einer Bentonit-Zementsuspension.....	61
Abbildung 5-12: Abdichtungskörper einer Bentonit-Zementsuspension mit Hohlraum	62
Abbildung 5-13: Versuchsaufbau zur Basisversuchsreihe Rohrbettung.....	63
Abbildung 5-14: Zusammenhang zwischen Wasserverlustrate und Suspensionsverbrauch	64
Abbildung 5-15: Versuchsaufbau zur Basisversuchsreihe Schwingungserzeugung.....	65
Abbildung 5-16: Einfluss der Schadstellengeometrie auf die Erosionsstabilität.....	66
Abbildung 5-17: Versuchsaufbau Grundleitungsnetz.....	67
Abbildung 5-18: Eingebautes Grundleitungsnetz aus Kunststoff- und Steinzeugrohren....	68
Abbildung 5-19: Saniertes Grundleitungsnetz mit Abdichtungskörpern.....	70
Abbildung 5-20: Abdichtungskörper um die Schadstellen 2 und 3.....	71
Abbildung 5-21: Abdichtungskörper um die Schadstelle 1	71
Abbildung 6-1: Kostenzusammensetzung beim Wasserglas – Flutungsverfahren	73
Abbildung 6-2: Kostenvergleich	74

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Durchlässigkeitsbereiche in Abhängigkeit vom Durchlässigkeitsbeiwert	16
Tabelle 4-1: Fließmomente in Abhängigkeit der Mischdauer.....	24
Tabelle 5-1: Schadensstellen im Hauptversuch.....	67

1 Einleitung

1.1 Vorwort

Im Zeitraum vom 1. Februar bis 31. Juli 2004 wurde am ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb der RWTH Aachen eine "Machbarkeitsstudie zur Sanierung von Grundleitungsnetzen mit Injektionssuspensionen auf mineralischer Basis" durchgeführt.

Die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie zeigten, dass ein neues Sanierungsverfahren mit mineralischen Injektionssuspensionen unter wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkten gute Realisierungschancen besitzt¹. Daher wurde auf der Basis der in der Studie erarbeiteten Konzepte ein Forschungsprojekt zur Entwicklung eines neuen Sanierungsverfahrens für undichte Grundleitungsnetze beantragt und beauftragt. Nachfolgend wird über den Ablauf und die Ergebnisse dieses Forschungsprojektes berichtet.

1.2 Ausgangssituation

Gemäß § 61 a des nordrhein-westfälischen Landeswassergesetzes müssen alle im Erdreich verlegten Abwasserleitungen, insbesondere privater Grundstücksentwässerungen, spätestens bis zum 31.12.2015 auf ihre Dichtheit geprüft und gegebenenfalls saniert werden. Private Leitungsnetze, die sich in einem Wasserschutzgebiet befinden, sollten nach dem § 45 der Bauordnung NRW bereits bis zum 31.12.2005 geprüft worden sein². Auch wenn die Zuständigkeit seit Dezember 2007 durch eine Überführung des alten § 45 der Bauordnung NRW in einen neuen § 61 a des Landeswassergesetzes NRW verschoben wurde, ist davon auszugehen, dass die gesetzlichen Vorgaben auch in Zukunft einen Standard für Grundstücksentwässerungsanlagen vorgeben, der mit den zur Zeit am Markt befindlichen Sanierungsverfahren technisch und wirtschaftlich nur schwer zu erreichen sein wird. Es fehlt vor allem an geeigneten Verfahren, um alle schadhafte Grundleitungsnetze sicher, dauerhaft und kostengünstig sanieren zu können.

In der Praxis werden schadhafte Grundleitungen entweder neu verlegt – meist als abgehängte Leitung – oder mit dem Flutungsverfahren abgedichtet. Die Anwendungsmöglichkeiten beider Sanierungsarten sind allerdings beschränkt. Die Neuverlegung mit abgehängten Leitungen kann wegen baulicher Randbedingungen – beispielsweise der einzuhaltenen Durchgangshöhen – nicht immer ausgeführt werden. Das Flutungsverfahren ist

¹ Vgl. Machbarkeitsstudie, Sanierung von Grundleitungsnetzen, 2004, S.48.

² Vgl. § 45 Abs. 5 Bauordnung für das Land Nordrhein-Westfalen, Fassung vom 01.03.2000, S.40.

bei größeren Leitungsschäden wegen der Einschränkungen durch die bauaufsichtliche Zulassung nur bedingt einsetzbar.

Aufgrund der fehlenden Sanierungsalternativen für Grundleitungsnetze wurde im Rahmen der bereits erwähnten Machbarkeitsstudie die Möglichkeit geprüft, ein neues Sanierungsverfahren auf Basis mineralischer Suspensionen (Zement- und / oder Bentonitsuspensionen) zu entwickeln. Im Unterschied zu den beim Flutungsverfahren verwendeten Injektionsmitteln auf Wasserglasbasis sind mineralische Injektionsmaterialien in der Regel deutlich kostengünstiger sowie umweltfreundlicher und können daher auch bei größerem Schadensumfang eingesetzt werden.

2 Motivation und Ziel

Die Sanierung von Grundleitungsnetzen in geschlossener Bauweise ist aufgrund der spezifischen Randbedingungen, wie geringe Rohrdurchmesser, viele Leitungsverzweigungen, Materialwechsel, unfachmännischer Einbau und oft nur ungenaue Kenntnisse über den Leitungsverlauf mit diversen Problemen behaftet. Das einzige Verfahren, das derzeit diesen Herausforderungen mit einer kompletten Sanierung in einem Arbeitsgang begegnet, ist das am Markt bereits bekannte Flutungsverfahren, mit Injektionsmitteln auf Wasserglasbasis.

Bei den Sanierungen mit dem Wasserglas - Flutungsverfahren werden zwei chemische Lösungen, Komponente 1 und Komponente 2, nacheinander durch die Schadstellen der Leitungen in die Leitungszone injiziert. Die Abdichtung der Schadstellen wird durch die Ausbildung lokaler Boden-Gel-Körper erzielt, die sich aus den Feststoffen des Bodens und dem Reaktionsprodukt der Injektionskomponenten zusammensetzen. Aufgrund der Festigkeitseigenschaften des Reaktionsproduktes geht mit der Abdichtung der Schadstellen auch eine Verfestigung des injizierten Bodenbereiches einher (s. Abbildung 2-1).

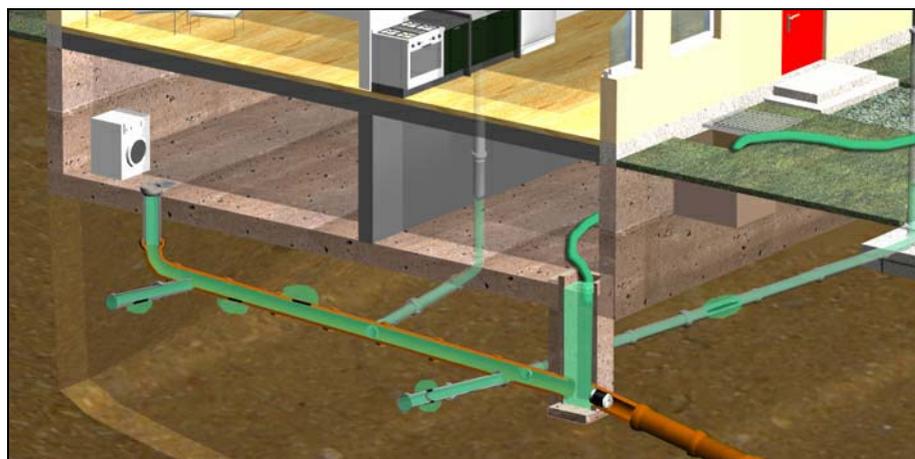


Abbildung 2-1: Sanierung mit dem Flutungsverfahren

Quelle: Sindermann, T., Flutungsverfahren, 2006, S. 27.

Die Verfahrenstechnik des Wasserglas - Flutungsverfahrens ist gekennzeichnet durch die Nutzung des zu sanierenden Leitungssystems als Förder- und Verteilleitung und durch das Injizieren mittels einer hydrostatischen Druckhöhe.³ Diese Merkmale erübrigen den Einsatz einer aufwändigen Gerätetechnik. Neben Absperreinrichtungen zur Begrenzung der Sanierungsabschnitte werden für die Sanierungsausführung hauptsächlich Materialvorräte für die Komponenten und eine Pumpe mit entsprechenden Zuleitungen benötigt.

³ Vgl. Stein, D., Kanalisationen, 1998, S. 409.

Der geringe technische Aufwand, der sich vor allem in der Tatsache ausdrückt, dass keine gezielte Befahrung des Leitungsnetzes zur Lokalisierung und Sanierung der Schadstellen erforderlich ist, lässt das Verfahren als eine optimale Methode zur Sanierung von Grundstücksentwässerungsanlagen erscheinen. Allerdings können große Verbrauchsmengen der Injektionslösung durch die hohen Materialpreise zu enormen Sanierungskosten führen. Zusätzlich zeigen langjährige Untersuchungen⁴, dass die Umweltverträglichkeit umstritten ist, und die Dauerhaftigkeit bei ungünstigen Randbedingungen sehr begrenzt sein kann.

Unter Berücksichtigung der Vorteile des Wasserglas - Flutungsverfahrens sollen in diesem Forschungsvorhaben alternativ mineralische Injektionsmaterialien zur Sanierung von Grundleitungen erprobt werden.

In der vorangegangenen Machbarkeitsstudie wurden bereits verschiedene Konzepte für das neuartige Sanierungsverfahren erarbeitet, die unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten unterschiedliche Vor- und Nachteile aufweisen. Für die Umsetzung und Erprobung der empfehlenswertesten Konzepte müssen die erforderlichen Grundvoraussetzungen geschaffen und geeignete Suspensionen sowie die entsprechenden Verfahrenstechniken entwickelt werden. Die Verwendung mineralischer Injektionssuspensionen in Grundleitungen ist mit höheren Anforderungen an Material und Gerät verbunden, als dies bei Verwendung der Wasserglaslösungen des Flutungsverfahrens der Fall ist. Daher müssen neue, auf mineralische Suspensionen angepasste verfahrenstechnische Lösungen entwickelt und erprobt werden.

Nach in situ nahen Versuchen soll ein Sanierungsverfahren auf Basis mineralischer Injektionssuspensionen zur Verfügung stehen, das ein möglichst breites Anwendungsspektrum abdeckt, wie beispielsweise bezogen auf den Grad der Undichtigkeit sowie die Art der Schäden.

⁴ Vgl. o. V., Flutungsverfahren, 2006

3 Sanierungsverfahren

Die Sanierung mit mineralischen Injektionssuspensionen (Injektionsgut) erfolgt in Anlehnung an die Verfahrenstechnik des Wasserglas - Flutungsverfahrens. Jedoch wird im Gegensatz zum Wasserglas - Flutungsverfahren das Leitungsnetz mit einem einkomponentigen, mineralischen Material geflutet. Die Sanierungssuspension dringt durch den hydrostatischen Druck von ca. 0,2 bar durch die Schadstellen in den das Rohr umgebenden Boden (Injektionsmedium) ein und bildet außerhalb der Rohrleitung einen Abdichtungskörper.

In Abhängigkeit des Injektionsmediums „Boden“ und der wesentlichen Eigenschaften des Injektionsgutes „Suspension“, wie der Viskosität, der Injektionszeit und des Injektionsdruckes, dringt eine bestimmte Menge Injektionsgut bis zu einer bestimmten Injektionsfront in den Boden ein. Nachdem sich ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat, wird das Restmaterial am tiefsten Punkt der Entwässerungsanlage abgepumpt. Da der hydrostatische Druck, der über das Injektionsmaterial in der Rohrleitung aufgebaut wird, nach dem Abpumpen nicht mehr auf das bereits in den Boden eingedrungene Injektionsmaterial wirkt, würden Teilmengen des Materials wieder in die Rohrleitung zurückfließen. Der hieraus resultierend Injektionskörper würde nur unzureichend den Qualitätsanforderungen an dauerhaft dichte Grundleitungen entsprechen. Um dennoch einen qualitativ hochwertigen Abdichtungskörper zu erhalten, muss dem Zielkonflikt unterschiedlicher Anforderungen vor und nach der Injektion bei der Konzeption des Sanierungsmaterials und bei der Verfahrenstechnik Rechnung getragen werden.

3.1 Injektionsmaterialien

Die Sanierungssuspension füllt den Porenraum des rohrumgebenden Bodens auf. Somit gelten die aus der Bauverfahrenstechnik der konventionellen Injektionsverfahren bekannten Wirkungsweisen für Auffüllinjektionen. Wie aus der Abbildung 3-1 ersichtlich ist, muss das Injektionsgut in seiner Zusammensetzung nach dem Injektionsmedium ausgerichtet werden. Da die Anwendung sowohl bei Böden, die im dicht gelagerten feinsandigen Bereich liegen, als auch bei locker gelagerten Kiesen oder sogar Hohlräumen erfolgreich sein soll, muss die Injektionssuspension in einem breiten Anwendungsspektrum einsetzbar sein.

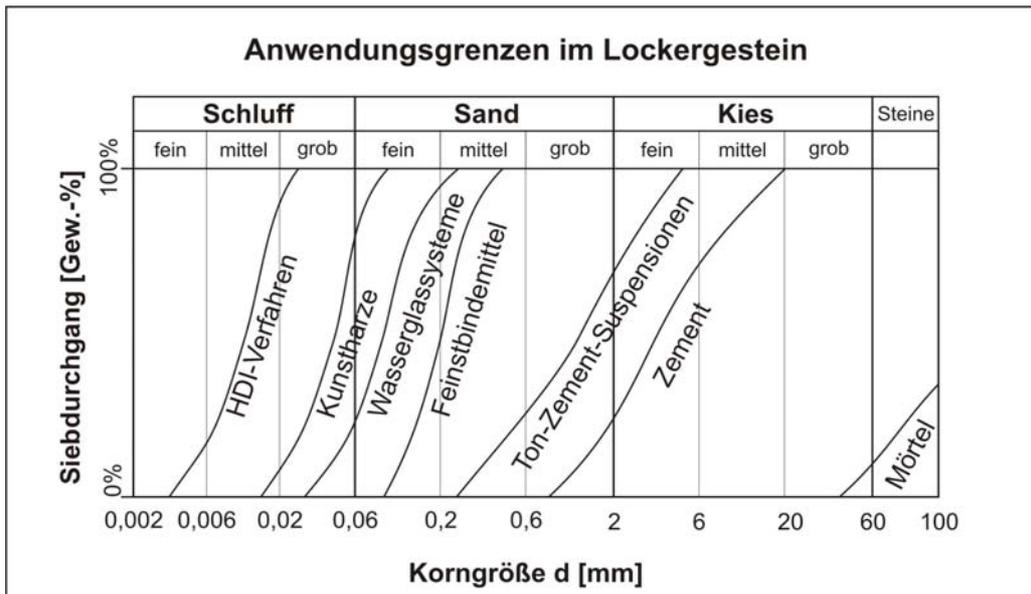


Abbildung 3-1: Anwendungsgrenzen im Lockergestein

Ein Lösungsweg besteht in der Nutzung thixotroper⁵ Eigenschaften von speziellen Suspensionen als Injektionsmaterialien. Damit das Material dennoch gut in die Poren des Bodens eindringt, kann während der Injektion die Viskosität der Suspension durch mechanische Schwingungsenergie verringert werden. Sobald keine Schwingungsenergie mehr in die Suspension eingebracht wird, steigt die Viskosität der Suspension an. Nach dem Abpumpen des Injektionsmaterials verbleibt das in den Porenraum des Bodens injizierte Material aufgrund der höheren Viskosität im Boden und bildet dort den Abdichtungskörper. Der Viskositätsunterschied muss für die Anwendung bei Auffüllinjektionen im Lockergestein allerdings so groß sein, dass das Injektionsmaterial vor der Injektion in das feine Porengefüge des anstehenden Bodens eindringen kann, jedoch nach der Injektion - im viskoserem Zustand - nicht mehr zurückfließt. Diese Anforderung kann mit Hilfe thixotroper Suspensionen, wie z.B. Bentonitsuspensionen oder Stärkesuspensionen erfüllt werden.

Zur Erstellung von Schlitzwänden⁶ sowie Dichtwänden hält der Markt eine Vielzahl von Produkten bereit, die sowohl thixotrope Eigenschaften als auch eine abdichtende Funktion aufweisen. Grundsätzlich ist hier zu unterscheiden zwischen reinen Bentonitsuspensionen und Bentonit-Zementsuspensionen. Durch Zusatzstoffe und Zusatzmittel, wie sie auch aus der Betontechnologie bekannt sind, werden wichtige Eigenschaften, wie die Viskosität oder die Stabilität der Suspensionen, auf den jeweiligen Anwendungsfall eingestellt. Neben

⁵ Thixotropie bezeichnet die Eigenschaft eines Fluids, bei einer konstanten Scherung über eine bestimmte Zeiteinheit die Viskosität abzubauen. Nach Aussetzung der Scherbeanspruchung wird die Ausgangsviskosität wieder aufgebaut.

⁶ Eine Schlitzwand ist ein Bauelement, das für Baugrubensicherungen von tiefen Baugruben Verwendung findet. Zur Stabilisierung während der Aushubarbeiten wird eine stützende Flüssigkeit (meistens Bentonitsuspensionen) in den Schlitz eingefüllt.

der Schlitzwandtechnologie finden sich mineralische Suspensionen auch bei Bodenverbesserungsmaßnahmen und im Tunnelbau wieder. Voraussetzung für diese zahlreichen Anwendungen ist natürlich die ökologische Unbedenklichkeit, besonders dann, wenn große Mengen zum Einsatz kommen. Durch eine jahrzehntelange, gute Erfahrung mit mineralischen Suspensionen im Bauwesen lässt sich auch ein sinnvoller wirtschaftlicher und umweltfreundlicher Einsatz im Sanierungssektor ableiten.

3.1.1 Reine Bentonitsuspensionen

Als Bentonite werden Tone bezeichnet, die aufgrund ihrer mineralischen Zusammensetzung eine gute Wasseraufnahmefähigkeit und ein damit verbundenes hohes Quellvermögen aufweisen. Durch diese wesentlichen Eigenschaften haben sich Bentonite für zahlreiche Anwendungen im Tiefbau als sehr vorteilhaft erwiesen. Des Weiteren gelten sie als umweltverträglich und sehr kostengünstig. In Abhängigkeit des mineralogischen Aufbaues lassen sich die folgenden im Bauwesen relevanten natürlichen Bentonite unterscheiden:

- Calciumbentonit
- Natriumbentonit

Da Calciumbentonit eine sehr viel geringere Quellfähigkeit als Natriumbentonit aufweist, jedoch Natriumbentonit in natürlichen Lagerstätten sehr selten ist, wird über ein Ionenaustauschverfahren natürlicher Calciumbentonit in sogenannten „Aktivbentonit“ umgewandelt. Der auf diese Weise gewonnene Aktivbentonit ist in der Regel preisgünstiger als der natürliche Natriumbentonit, entspricht in seinen Eigenschaften jedoch weitgehend dem Natriumbentonit. Außerdem kann die Produkteigenschaft während der Aufbereitung genau gesteuert werden und hierdurch eine konstante Qualität erreicht werden.

Wird aus Bentonit und Wasser eine Suspension hergestellt, entsteht ein thixotropes Gel. Durch eine kolloidale⁷ Mischtechnik wird der Bentonit in seine Elementarschichten zerlegt. Vor der Dispergierung sind die Elementarschichten in dicht gelagerten Paketen angeordnet. Durch den kolloidalen Aufschluss bilden die Bentonitplättchen im Wasser eine Gerüststruktur aus, die mit dem eines Kartenhauses vergleichbar ist. Durch diese Struktur steigt die innere Reibung der Flüssigkeit und die Fließfähigkeit wird herabgesetzt. Wird das Gerüst durch mechanische Einwirkungen zerstört, verflüssigt sich die Suspension wieder und die Viskosität sinkt. In einer weiteren Ruhephase ordnen sich die Bentonitplättchen wieder zu einem neuen, immobilisierenden Gerüst an.

⁷ Als Kolloide werden Festkörper bezeichnet, die in der Größenordnung von 1 bis 1000 nm innerhalb eines Mediums fein verteilt vorliegen.

Für die Entwicklung des Injektionsmaterials wurden verschiedene Calcium- und Aktivbentonite der Fa. S&B Minerals, Mannheim, untersucht. Diese für spezielle Einsatzbereiche entwickelten Bentonite werden nachfolgend mit dem Produktnamen und der in der Arbeit verwendeten Abkürzung aufgeführt:

- Aktiv-Bentonit IBECO CT (CT)
- Aktiv-Bentonit IBECO B 1 (B1)
- Aktiv-Bentonit IBECO B 2 (B2)
- Calciumbentonit IBECO Deponit CA (CA)

Die ersten drei Produkte sind aktivierte Calciumbentonite für Dichtwandmassen und Injektionssuspensionen. Der vierte Bentonit ist ein natürlicher Calciumbentonit für den Deponebau.

3.1.2 Bentonit-Zementsuspensionen

Reine Zementsuspensionen mit hohen Wasseranteilen neigen stark zur Sedimentation der Feststoffe. Deshalb wird diesen wässrigen Suspensionen Bentonit als Stabilisator zugegeben. Durch die strukturbildenden Eigenschaften der Bentonitplättchen wird das Absetzen der Zementbestandteile verhindert und eine homogene Verteilung der Feststoffe gewährleistet. Die Sedimentationsstabilität wird bereits bei geringen Bentonitzusätzen von 1 bis 5% bezogen auf das Zementgewicht erreicht. Zu hohe Zugabemengen können jedoch zu Festigkeitseinbußen führen, wodurch die Qualität des Abdichtungskörpers beeinträchtigt wird. Des Weiteren können über den Bentonitanteil die rheologischen Eigenschaften und die Wasserdichtigkeit des Injektionsmaterials gesteuert werden. Zur Anwendung als Sanierungssuspension werden Bentonitzugabemengen bis zu 20 % bezogen auf das Zementgewicht untersucht.

Für den Einsatz in Bentonit-Zementsuspensionen eignen sich nur zementstabile Aktivbentonite, bei denen durch eine spezielle Behandlung ein negativer Ionenaustausch zwischen Zement und Bentonit unterbunden wird. Für die Untersuchungen wurde daher der zementstabile Bentonit Ibeco CT verwendet, dessen Eigenschaften bereits aus den Versuchen mit reinen Bentonitsuspensionen bekannt waren.

Die Sanierung mit mineralischen Injektionsmaterialien durch Flutung des Leitungsnetzes setzt eine lange Verarbeitungszeit der Suspension voraus, in der das Injektionsmaterial möglichst gleich bleibende Eigenschaften aufweist. Nach dem Anmischen der Suspension muss der Erstarrungsbeginn der Zementphase möglichst spät erfolgen. Da es sich um sehr wässrige Suspensionen handelt, ist der Hydratationsprozess von Natur aus eher langsam. Außerdem kann durch Auswahl geeigneter Zemente Einfluss auf den Erstar-

rungsbeginn genommen werden. Ein wichtiger Parameter ist hierbei die Mahlfineinheit des Zementes. Zemente mit hoher Mahlfineinheit besitzen durch die große Oberfläche der Einzelkörner ein hohes Reaktionspotenzial und steifen daher schneller an. Auf der anderen Seite kann gerade durch den Einsatz solch feinkörniger Zemente das Eindringvermögen in den engen Porenraum erheblich verbessert werden (s. Abbildung 3-1). Das Erstarrungsverhalten kann des Weiteren über die Zementzusammensetzung reguliert werden. Hütten-sandreiche Hochofenzemente besitzen eine lange Verarbeitungszeit und weisen zudem einen hohen Sulfatwiderstand auf. Besonders bei der Sanierung von Abwasserleitungen ist die Sulfatbeständigkeit von hoher Bedeutung.

In den Versuchen wurden sowohl Fertigprodukte der Zementindustrie, als auch eigene Mischungen untersucht. Im Einzelnen waren dies:

- Fertigprodukte:
 - Füllbinder L, Fa. Schwenk Zement KG, Ulm
 - Drill-mix, Fa. Anneliese BUT, Ennigerloh

- Eigene Bentonit-Zementmischungen aus den Bestandteilen:
 - Bentonit :
 - Aktiv-Bentonit IBECO CT (CT)
 - Zement :
 - Standardbindemittel:
 - Hochofenzement CEM III/B 32,5 N – NW/HS
 - Feinbindemittel:
 - Finagrain, Fa. Anneliese BUT, Ennigerloh
 - Feinstbindemittel:
 - Microcem A, Fa. Anneliese BUT, Ennigerloh
 - Mikrodur R-U, Fa. Dyckerhoff AG, Wiesbaden
 - Mikrodur R-X, Fa. Dyckerhoff AG, Wiesbaden

Das Fertigprodukt Füllbinder L besteht aus hydraulischen Bindemitteln und ausgewählten Gesteinsmehlen mit hohem Tonanteil. Suspensionen mit dem Produkt weisen eine gute Fließfähigkeit und ein geringes Absetzverhalten auf. Sie werden vorzugsweise bei der Verfüllung von Hohlräumen und zur Abdichtung im Deponie – und Brunnenbau eingesetzt. Im erhärteten Zustand entsprechen die Festigkeit und die Durchlässigkeit denen dicht gelagerter Tonböden. Der umweltverträgliche Füllbinder ist auch in Trinkwasserschutzzonen zugelassen.

Drill-mix ist eine selbsterhärtende Bohrspülung, die für eine kraftschlüssige Stabilisierung und eine Abdichtung des Ringspaltes beim HDD-Verfahren⁸ eingesetzt wird. Das Fertigprodukt enthält einen zementstabilen Natriumbentonit und ein zementbasiertes Spezialbindemittel. Standardmäßig erfolgt ein Ansteifen der Bohrspülung erst nach zwei Tagen.

Zemente, die für Injektionsmaßnahmen eingesetzt werden, sind nach Ihrer Mahlfeinheit in die drei Bereiche Standardbindemittel, Feinzemente und Feinstzemente unterteilt. Die Mahlfeinheit kann entweder an dem Blainewert⁹ eines Zementes oder an der Sieblinie bestimmt werden. Die Unterscheidung nach der spezifischen Oberfläche ist für Feinstbindemittel nicht sinnvoll, da hieraus keine Informationen zum Größtkorn abgeleitet werden können. In Anlehnung an das Merkblatt für Einpreßarbeiten mit Feinstbindemittel in Lockergestein¹⁰ wird deshalb die Einteilung in Abhängigkeit der Korngrößenverteilung vorgenommen.

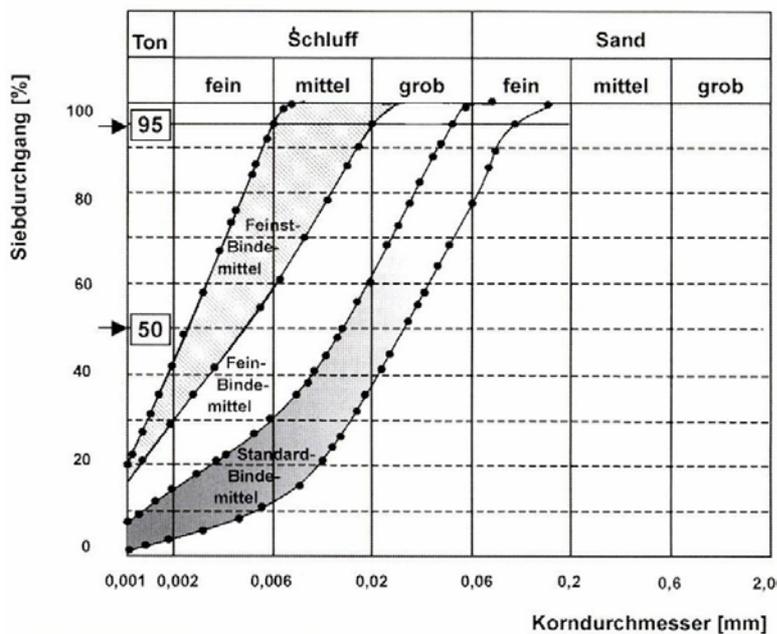


Abbildung 3-2: Bindemittelleinteilung anhand der Körnungslinie

Quelle: Schulze, B., Merkblatt Feinstbindemittel, 2002, S. 3.

⁸ Das HDD-Verfahren (Horizontal Directional Drilling) ist ein grabenloses, gesteuertes Bohrverfahren, mit dem über ein Sender- Empfängersystem Leitungen in beliebiger Trasse verlegt werden können.

⁹ Der Blainewert ist ein Maß für die spezifische Oberfläche von Zementen. Je größer die Oberfläche, desto feiner der Zement.

¹⁰ Vgl. Schulze, B., Merkblatt Feinstbindemittel, 2002, S. 3.

Die Maßeinheit für die Feinheit eines Bindemittels ist der Korndurchmesser d bei einem Siebdurchgang von 95 %. Die Unterteilung ist festgelegt zu:

- $d_{95} < 20 \mu\text{m}$ Feinstbindemittel
- $20 \mu\text{m} < d_{95} < 40 \mu\text{m}$ Feinbindemittel
- $d_{95} > 40 \mu\text{m}$ Standardbindemittel

Neben der Mahlfineinheit des Zementes ist auch die Aufbereitungstechnik der Suspension von entscheidender Bedeutung. Nur mit geeigneten Mischwerkzeugen und bei entsprechender Mischungsdauer können die Feinbestandteile richtig in der Suspension aufgeschlossen werden und ihre Wirkung voll entfalten. Wie bei den Bentoniten werden auch hier für die Versuche Kolloidalmischer mit hoher Mischintensität eingesetzt.

Das Standardbindemittel CEM III/B 32,5 N – NW/HS ist eine Hochofenzement mit einem Hüttensandanteil oberhalb von 66 %. Diese Zemente zeichnen sich durch ein langsames Abbindeverhalten und einen hohen Widerstand gegen chemische Angriffe aus. Das d_{95} Größtkorn liegt bei $80 \mu\text{m}$.

Finagrain ist ein Feinbindemittel mit einem d_{95} Größtkorn von ca. $20 \mu\text{m}$. Auf der Basis von Portlandzement (CEM I) ist es ein Spezialbindemittel für Injektionen im Tiefbau. Über chemische Additive wird eine flexible Steuerung der Suspensionseigenschaften erreicht. Der werkseitig empfohlene w/z-Wert liegt zwischen 0,8 bis 3.

Das Feinstbindemittel Microcem A wird ebenfalls auf der Basis von Portlandzement hergestellt. Mit einem Größtkorn d_{95} von unter $8 \mu\text{m}$ handelt es sich um ein mikrofeines hydraulisches Injektionsmittel für den Einsatz in sehr feinen Sandböden. Durch Flüssigadditive und einen w/z- Wert von 0,8 bis 3 lassen sich die Suspensionseigenschaften gezielt steuern.

Mikrodur R-U und Mikrodur R-X sind Produkte, die aufgrund ihrer Mahlfineinheit im Bereich der Feinstbindemittel noch extra unterteilt werden. Mikrodur R-U hat eine Feinheit von kleiner $9,5 \mu\text{m}$ und Mikrodur R-X ist mit d_{95} kleiner $6 \mu\text{m}$ noch feiner aufgemahlen. Beide Produkte werden auf Basis von Hochofenzement hergestellt und sind neben dem Injektions-einsatz in feinem Lockergestein und Fels auch zur Verpressung von Rissen im konstruktiven Ingenieurbau verwendbar. Die rheologischen Eigenschaften der Suspension können ebenfalls durch geeignete Zusatzmittel kontrollierbar beeinflusst werden.

3.1.3 Zusatzstoffe und Zusatzmittel

Die Begriffe Zusatzstoffe und Zusatzmittel werden in der Betontechnologie durch den prozentualen Masseanteil des Zugabestoffes an der Gesamtmischung voneinander abgegrenzt. Liegt die Zugabemenge unterhalb von 5 % handelt es sich um Zusatzmittel, die in der Stoffraumrechnung nicht berücksichtigt werden.

Zusatzstoffe sind fein aufgemahlene mineralische Stoffe, die zur Eigenschaftsverbesserung in Beton und Mörtel verwendet werden. Sie können nach DIN EN 206-1 in zwei Gruppen unterteilt werden:

- Nahezu inaktive Stoffe (z.B. Quarz- oder Kalksteinmehl)
- Latent hydraulische oder puzzolanische Stoffe (z.B. Flugasche oder Hüttensand)

Da inerte Stoffe im Beton und Mörtel als Füllstoffe zur Verbesserung der Fließfähigkeit dienen, jedoch in sehr wässrigen Suspensionen keine eigenschaftsverbessernde Wirkung haben, wird diese Art Zusatzstoff in den Versuchen nicht weiter untersucht. Latent hydraulische oder puzzolanische Stoffe reagieren hingegen mit den Hydratationsprodukten des Portlandzementes und bilden dabei zementsteinähnliche Strukturen, die zur Festigkeit und Dichtigkeit des Abdichtungskörpers beitragen. Für die Untersuchungen ist das Flugascheprodukt Microsit M 10 der Fa. BauMineral GmbH, Herten, mit einem Bindemittelanteil von bis zu 50 % eingesetzt worden.

Zusatzmittel werden der Suspension in flüssiger oder fester Form zugegeben, um durch chemische oder physikalische Wirkung die Eigenschaften günstig zu beeinflussen. Da in den Versuchen in erster Linie die Fließfähigkeit der Suspension verbessert werden sollte, wurde unter den vielseitigen Produktvariationen des Zusatzmittelmarktes das Fließmittel Addiment Injektionshilfe 1 der Fa. Sika Deutschland GmbH, Leimen, verwendet. Es wird in flüssiger Form zugegeben und unterstützt beim Anmischen der Suspension die Dispergierung und Benetzung des Bindemittels. Zudem setzt es durch eine verflüssigende Wirkung die Viskosität herab.

Als ein weiteres Zusatzmittel ist der thixotropierende Einfluss eines Stärkeproduktes getestet worden. Das Produkt ZFT 1099 der Fa. Tulln GmbH, Wien, zeichnet sich durch eine reversible Erhöhung der Fließgrenze aus und wird bei feststoffreichen Suspensionen mit w/z-Werten von ca. 0,45 mit einer Zugabemenge von nur 0,1 % als Feststoff eingemischt. Ziel der Untersuchungen mit dem Produkt ZFT 1099 war es, eine bentonitfreie Zementsuspension herzustellen, die dennoch stabil ist und ausreichend thixotrope Eigenschaften aufweist.

3.2 Verfahrenstechnik

Das Konzept der Sanierung mit mineralischen Suspensionen sieht vor, die thixotropen Eigenschaften bestimmter Flüssigkeiten zu nutzen. Um das Fließverhalten des Injektionsmaterials in gewünschter Weise beeinflussen zu können, muss durch eine geeignete Verfahrenstechnik mechanische Energie zur Verflüssigung in die Suspension eingebracht werden. Für die Anwendung in dem verzweigten Leitungsnetz von Grundstücksentwässerungsanlagen (GEA) ist mechanische Schwingungsenergie besonders geeignet. Die Schwingungen können sowohl auf die gesamte in der Leitung befindliche Suspension aufgebracht werden, als auch abschnittsweise durch einen in die Leitung eingebrachten Schwingungserreger. In den Versuchen werden die beiden Lösungsmöglichkeiten einer im gesamten in Schwingung versetzten Suspensionssäule und eines lokal begrenzten Energieeintrages in Form zweier verschiedener Verfahrenstechniken untersucht.

Die erste Möglichkeit sieht eine Schwingung vor, die an einem Ende des Leitungsnetzes erzeugt wird und sich durch das gesamte Leitungsnetz fortpflanzt. Eine ausreichend wirkungsvolle Wellenausbreitung gelingt nur bei einer geringen Schwingungsdämpfung. Maßgebende Parameter sind die Schwingungsfrequenz und die Amplitude, mit der die Suspensionssäule bewegt wird. Bei niedrigen Frequenzen ist die Fortpflanzung der Welle nur geringen Dämpfungen unterworfen. Hohe Amplituden hingegen gewährleisten einen ausreichenden Energieeintrag in weiter vom Schwingungsausgangspunkt entferntere Leitungsbereiche. Eine solche Schwingung kann an einer beliebigen Stelle des Leitungsnetzes über eine pulsierende Volumenverdrängung erzeugt werden. Mit Hilfe eines einfachen, händisch zu bedienenden Mechanismus wird die inkompressible Suspension impulsartig verdrängt (s. Abbildung 3-3). Der Volumenausgleich kann hierbei entweder über die Schadstelle oder am freien Ende der Suspensionssäule erfolgen.

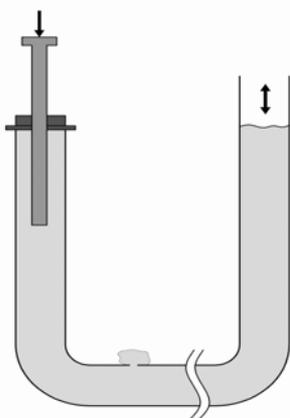


Abbildung 3-3: Schwingungserzeugung durch pulsierende Volumenverdrängung

Während bei der Schwingungserzeugung durch stoßartige Impulse eine niedrige Frequenz und eine hohe Amplitude erforderlich sind, kann bei einer lokal begrenzten Schwingung

auch mit hohen Frequenzen und geringen Amplituden gearbeitet werden. Die Erregung muss in diesem Fall zunächst nur die Suspension in unmittelbarer Nähe der Schadstelle erreichen. Eine darüber hinaus gehende Schwingungsausbreitung sorgt zusätzlich für einen geringeren Injektionswiderstand im Boden. Die Vibration versetzt den Boden durch Herabsetzung der Kohäsion in einen flüssigkeitsähnlichen Zustand, bei dem sich die Suspension auch unter niedrigem Injektionsdruck gut ausbreiten kann.

In den Versuchen wird die Vibration durch zwei unterschiedliche Schwingungserreger erzeugt:

- Druckluft-Kugelvibrator NCB 1, Netter GmbH, Mainz-Kastel
- Pneumatischer Innenrüttler Typ BGP 47, Belle Group, Derbyshire (England)

Bei beiden Bauarten werden durch Druckluft bewegliche Teile in hochfrequente Vibration versetzt. Die Erzeugung von Schwingungsenergie mit einem elektrischen Antrieb wird unter Berücksichtigung der Anwendung in Flüssigkeiten aus arbeitsschutztechnischen Gründen nicht untersucht. Mechanische Innenvibratoren haben den Nachteil einer relativ unflexiblen Biegewelle. Bei einem verzweigten Leitungsnetz muss der Vibrationsmechanismus mehrere Richtungsänderungen bis zu 90 ° vollziehen können.



Abbildung 3-4: Druckluft-Kugelvibrator Typ NCB

Eigentliches Einsatzgebiet des Druckluft-Kugelvibrators des Typs NCB ist die Transportunterstützung von Schüttgütern (s. Abbildung 3-4). Durch die Vibration werden Brückenbildungen und Anhaftungen verhindert und der Materialfluss aufrecht erhalten. Die Vibration wird in Form einer Kreisschwingung durch eine umlaufende Stahlkugel erzeugt. Durch den einfachen Aufbau ist der Vibrator störungsunempfindlich und besitzt eine geringe Baugröße.

Pneumatische Innenrüttler werden bei der Verdichtung von Frischbeton eingesetzt. Durch die Vibration wird die Viskosität des noch flüssigen Betons verringert, und die unerwünschten Luftblasen können Richtung Oberfläche entweichen. Je nach Anwendung liefert der

Markt ein breites Spektrum verschiedener Bauformen und Abmessungen. Durch die Wahl des Innenrüttlers vom Typ BGP 47 wird ein Produkt mittlerer Baugröße, hoher Zuverlässigkeit und garantierter Wasserdichtigkeit eingesetzt. Über den Betriebsdruck ist der Energieeintrag stufenlos regelbar.

3.3 Reinigung der sanierten Grundleitungen

Die Flutung des Entwässerungsnetzes erfordert im Nachlauf an die Sanierung eine Reinigung der Leitung von nicht abpumpbaren Suspensionsresten. Die Reinigung kann entweder durch eine Wasserspülung oder mit Hilfe von Reinigungselementen erfolgen, die über eine Umlenkstruktur durch die Leitung gezogen werden. Während der Reinigung verursachen insbesondere Querschnittsänderungen, Abzweige und verfestigte Ablagerungen Probleme für die mechanisch wirkenden Reinigungselemente. Daher wird eine Reinigung der Leitung mittels Wasserspülung verfolgt. Eine solche Reinigungsmethode kann sich natürlich auch kontraproduktiv auf die zuvor erstellten Sanierungskörper auswirken. Nach dem Abpumpen der Suspension muss daher eine gewisse Zeitspanne abgewartet werden, in der die zementhaltigen Suspensionen ausreichend abbinden können. Bei den reinen Bentonitsuspensionen kann auf eine nachlaufende Reinigung verzichtet werden, da durch den späteren Betrieb eine ausreichende Selbstreinigung erfolgt.

3.4 Wiederverwertung der Injektionssuspensionen

Im Sinne einer ressourcenschonenden Bauweise ist eine Wiederverwertung der eingesetzten Baustoffe anzustreben. Bentonitsuspensionen werden z. B. im Tunnelbau in einem hydraulischen Kreislauf eingesetzt. Sie dienen zum Transport des Bohrgutes und werden in Separationsanlagen gereinigt. Im zu untersuchenden Anwendungsfall kann die Suspension nach dem Abpumpen ebenfalls bei der nächsten Sanierung wieder eingesetzt werden. Um eine ausreichende Qualität zu gewährleisten, wäre der Einsatz von Separationsanlagen denkbar oder die bereits eingesetzte Suspension wird durch Mischen mit frischer Suspension ergänzt. Die Zwischenlagerung von reinen Bentonitsuspensionen ist in luftdichten Gefäßen und frostgeschützten Bereichen problemlos möglich.

Zementbasierte Suspensionen können auf die oben beschriebene Weise nicht bevorratet und wiederverwertet werden. Der Hydratationsprozess erlaubt nur eine einmalige Anwendung als Sanierungssuspension. Jedoch kann auch die erhärtete Suspension sinnvoll weiterverwendet werden.

Im Sinne des Mitteilungsblattes 20 „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen“ der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) wird auch eine Zurück-

führung von Baureststoffen am Ende ihrer Nutzungsphase in den Stoffkreislauf als Recycling bewertet. Ziel ist hierbei die Substitution von Rohstoffen durch das Gewinnen von Stoffen aus Abfällen (sekundäre Rohstoffe) oder die Nutzung der stofflichen Eigenschaften der Abfälle für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke.¹¹

Da es sich bei der erstarrten Restsuspension um einen sortenreinen Baustoff mit bekannter Zusammensetzung handelt, ist er für einen wirtschaftlichen Recyclingprozess besonders gut geeignet. Ein Einsatzgebiet kann in diesem Zusammenhang die Oberflächenabdichtungen im Deponiebau sein. Dieses Abdichtungssystem hat die Aufgabe, das Eindringen von Niederschlagswasser in den Deponiekörper und somit die Neubildung von kontaminiertem Sickerwasser zu minimieren. Bei herkömmlichen Hausmülldeponien soll zudem die Emission von Deponiegasen in die Atmosphäre reduziert werden.

Wesentlicher Bestandteil der Abdichtung sind gas- und flüssigkeitsundurchlässige Bodenschichten. Die erhärtete Bentonit-Zementsuspension hat einen Durchlässigkeitsbeiwert k von ca. $8 \cdot 10^{-8}$ m/s, ist also nach DIN 18130-1 als schwach bis sehr schwach durchlässiger Boden einzuordnen (s. Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Durchlässigkeitsbereiche in Abhängigkeit vom Durchlässigkeitsbeiwert
Quelle: DIN 18130-1, 1998, S. 3.

k m/s	Bereich
unter 10^{-8}	sehr schwach durchlässig
10^{-8} bis 10^{-6}	schwach durchlässig
10^{-6} bis 10^{-4}	durchlässig
10^{-4} bis 10^{-2}	stark durchlässig
über 10^{-2}	sehr stark durchlässig

Als Recyclingmaßnahme mit direktem Wiederverwertungspotenzial ist prinzipiell auch eine Revitalisierung der Hydratationseigenschaften denkbar. Untersuchungen zur Nutzung von Betonbrechsanden mit Kornfraktionen kleiner 4 mm haben gezeigt, dass die thermische Reaktivierung des erhärteten Zementsteines zu einem hydraulischen Bindemittel möglich ist.¹² Der hierzu notwendige Energieeintrag durch Mahlen und Brennen des Zementsteines ist auch unter wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten in Konkurrenz zur normalen Zementherstellung sinnvoll. Bisher ist das Verfahren jedoch nur wissenschaftlich untersucht worden und hat noch nicht zu konkreten Anwendungen in der Bindemittelin-

¹¹ Vgl. Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) § 4 Abs. 3.

¹² Vgl. Dora, B., Baustoffe aus Betonbrechsand, 2001

dustrie geführt. Da diese Art der Wiederverwertung in einem industriellen Großmaßstab erfolgen müsste, können für die zementbasierten Suspensionen direkte Anwendungen auch erst aufgezeigt werden, wenn das Sanierungsverfahren bereits flächendeckend eingesetzt wird und die anfallenden Reststoffmengen besser eingeschätzt werden können. Anwendungsbereiche könnten dann der Einsatz als hydraulisch wirksamer Zusatzstoff für Beton oder als Bindemittel für Halbzeuge wie z. B. Mauersteine sein.

4 Vorversuche

Die Qualität der Sanierungen mit einem mineralischen Sanierungsverfahren hängt maßgeblich von den im Einzelfall vorliegenden Randbedingungen ab. Die Sanierungsbedingungen ergeben sich einerseits aus den verfahrenstechnischen Parametern sowie andererseits aus der Bettung und dem Zustand eines Leitungsnetzes.

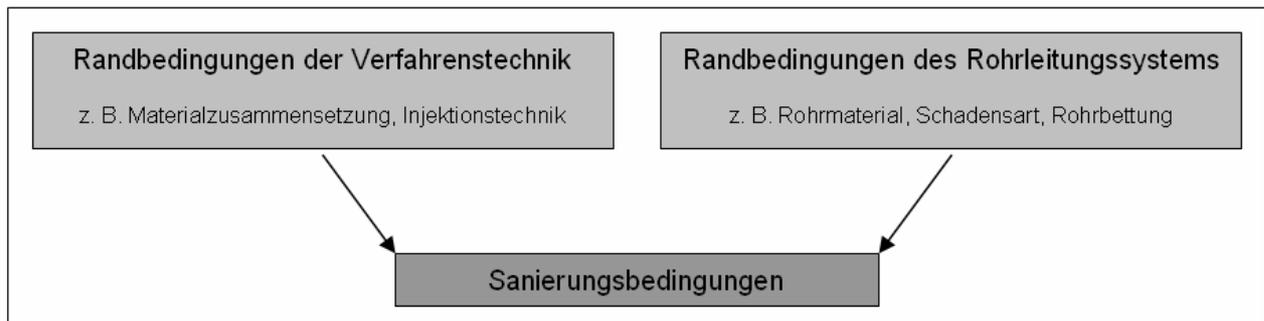


Abbildung 4-1: Randbedingungen der Sanierung

Da in situ nahe Versuche aufgrund eines komplexen Versuchsaufbaus nicht immer unter exakt gleichen Randbedingungen durchgeführt werden können, ist zunächst die Abschätzung der Einflusshöhe einiger verfahrenstechnischer Parameter im Rahmen von Vorversuchsreihen notwendig. Ist der Einfluss von Materialzusammensetzung und Injektionstechnik bekannt, können die Auswirkungen der Randbedingungen des Rohrleitungssystems von diesen verfahrenstechnischen Randbedingungen abgegrenzt und praxisnah untersucht werden.

4.1 Rheologischen Untersuchungen

Die Fließfähigkeit und damit auch die Injektionsfähigkeit des Sanierungsmaterials wird im Wesentlichen durch die Zusammensetzung, die Zeitspanne nach dem Anmischen und die Mischtechnik bestimmt. Die Materialeigenschaften können mit Hilfe rheologischer Messungen quantifiziert und analysiert werden. Unter dem Oberbegriff der Rheologie werden die Gesetzmäßigkeiten des Fließverhaltens von Flüssigkeiten und Feststoffen unter der Einwirkung äußerer Kräfte zusammengefasst.¹³ In den bei dieser Anwendung vorliegenden Fragestellungen werden zur Beschreibung der Rheologie die Materialkennwerte Viskosität γ und Fließgrenze η herangezogen. Die Viskosität ist ein Maß für die Zähigkeit bzw. die innere Reibung und somit für den Widerstand, den eine Flüssigkeit gegen die Einwirkung äußerer Kräfte aufbringt. Da es sich bei den Sanierungsmaterialien um Sus-

¹³ Vgl. Blask. O., Rheologie von Bindemittelleimen, 2002, S. 71.

pensionen handelt, also um Mischungen von Flüssigkeiten und Feststoffen, wird die Rheologie von beiden Materialgruppen beeinflusst.

Solche als viskoelastisch bezeichnete Materialien zeichnen sich durch die Ausbildung von Fließgrenzen aus. Unterhalb einer bestimmten Schubspannung verhält sich das Material elastisch wie ein Feststoff und oberhalb der Fließgrenze zeigt es die Viskositätseigenschaften von Flüssigkeiten. Die Größen Viskosität und Fließgrenze lassen sich anhand von Fließkurven in einem Schubspannungs- Schergeschwindigkeitsdiagramm darstellen (s. Abbildung 4-2). Die Viskosität ergibt sich aus der Steigung der Fließkurve. Die Fließgrenze ist die Schubspannung, die sich bereits vor Fließbeginn, also bei der Schergeschwindigkeit null einstellt. Je nach Ausbildung von Viskosität und Fließgrenze werden verschiedene Flüssigkeitstypen unterschieden. Bentonithaltige Suspensionen werden der Gruppe der strukturviskosen Flüssigkeiten mit Fließgrenze zugeordnet.

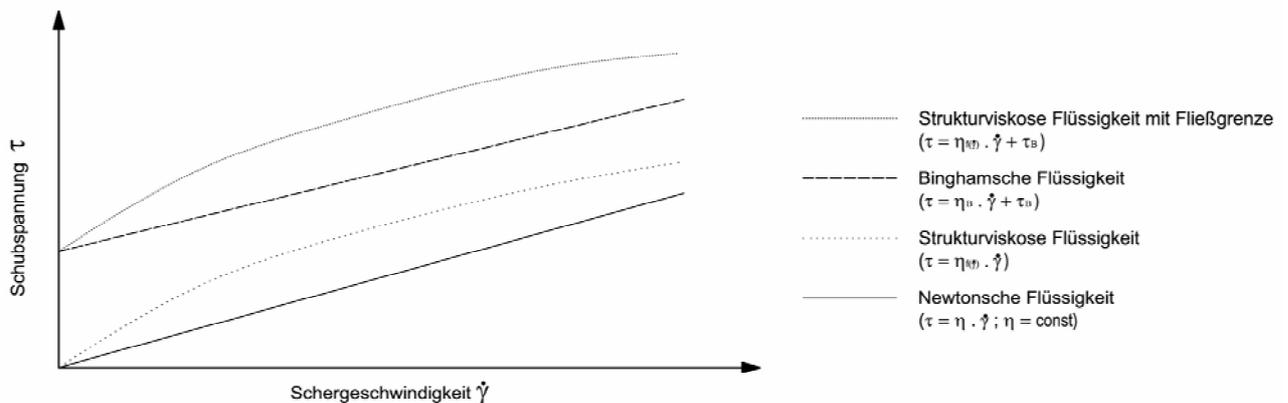


Abbildung 4-2: Fließkurven unterschiedlicher Flüssigkeitstypen

Quelle: in Anlehnung an, Gehr, L. Rheologie, 1998, S. 38.

Anders als bei reinen Flüssigkeiten können Fließkurven bei Suspensionen nicht direkt durch Scherversuche erstellt werden. Mit verschiedenen Messgeräten lassen sich jedoch quasi-rheologische Messgrößen für die Viskosität und die Fließgrenze ermitteln.

Eine einfache Methode zur relativen Beschreibung der Viskosität ist der Marshtrichter-Versuch nach DIN EN 14117. Bei dieser Prüfung wird die Zeit gemessen, die ein Liter Flüssigkeit benötigt, um durch einen genormten Durchlaufkonus (Marshtrichter) zu fließen (s. Abbildung 4-3). Je geringer die Viskosität der Flüssigkeit, desto schneller fließt sie aus dem Marshtrichter heraus und umso kleiner ist die gemessene Marshzeit. Wasser hat z. B. eine Marshzeit von 28 Sekunden, während hingegen hochviskose Bentonitsuspensionen im Schlitzwandbau Marshzeiten von über 60 Sekunden aufweisen können.



Abbildung 4-3: Marshtrichter-Versuch
Quelle: Märten, A., Qualität ist kein Zufall, 2002

Mit Hilfe des Marshtrichter-Versuches besteht die Möglichkeit, schnell und einfach auf der Baustelle eine Qualitätskontrolle der Suspension durchzuführen. Die gewünschte Viskosität kann dann durch Zugabe von Wasser oder Feststoffen eingestellt werden.

Eine genauere Messmethode zur relativen Beschreibung von Viskosität und Fließgrenze bieten sogenannte Rotationsviskosimeter. Für zementhaltige Suspensionen werden Viskosimeter mit speziellen Messgeometrien eingesetzt. Für die Untersuchungen wurde der Viskomat NT der Fa. Schleibinger, Buchbach, eingesetzt (s. Abbildung 4-4).



Abbildung 4-4: Rotationsviskosimeter Viskomat NT

Die zu untersuchende Flüssigkeit befindet sich dabei in einem rotierenden Zylinder (Messkopf), in den ein fest stehendes Messpaddel eingetaucht wird. Die durch die Drehbewegung der Suspension auf das Paddel aufgebrachten Scherkräfte werden über eine Drehmomentenmessung in der Achse des Messpaddels erfasst (s. Abbildung 4-5). Durch die

Formgebung des Messpaddels werden Entmischungsvorgänge während der Rotation unterbunden. Es kommt zu einem komplexen dreidimensionalen Strömungsvorgang, der keine Umrechnung der Messgrößen (Drehmoment und Rotationsgeschwindigkeit) in die rheologischen Grundgrößen (Schubspannung und Schergeschwindigkeit) zulässt. In Abhängigkeit der Viskosität, der Fließgrenze und der Schergeschwindigkeit lassen sich allerdings über das gemessene Drehmoment und die Rotationsgeschwindigkeit quasi-rheologische Werte ermitteln.

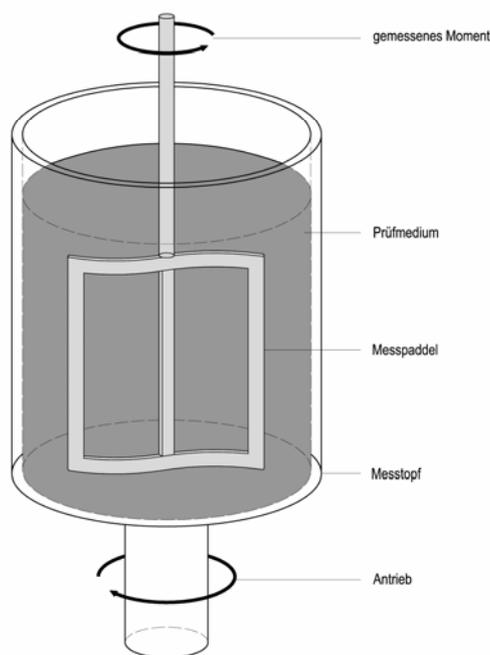


Abbildung 4-5: Messprinzip des Rotationsviskosimeters mit Paddel

In einem Drehmoment-Rotationsgeschwindigkeitsdiagramm ergeben die aufgetragenen Messwerte eine relative Fließkurve. In dem programmierbaren Viskomat NT wird hierzu ein Geschwindigkeitsmessprofil mit konstanter Beschleunigung und anschließend konstanter Verzögerung vorgegeben (s. Abbildung 4-6, links). Es entsteht eine Hysteresekurve, die aus einer „Gel-Kurve“ (Beschleunigungsphase) und einer „Sol-Kurve“ (Verzögerungsphase) besteht (s. Abbildung 4-6, rechts).¹⁴ Während der Beschleunigungsphase findet ein Strukturbruch statt, der mit Erreichen des lokalen Maximums in der Gel-Kurve abgeschlossen ist. Bei thixotropen Flüssigkeiten ist dieses Verhalten je nach Belastungsgeschichte der Suspension unterschiedlich stark ausgeprägt. Eine von der Vorgeschichte unabhängige und rekonstruierbare Beurteilung der Fließeigenschaften kann deshalb nur über die Sol-Kurve erfolgen. An dieser kann die relative Fließgrenze in Form eines Widerstandsdrehmomentes bei sehr geringen Drehgeschwindigkeiten abgelesen werden (dynamisches Fließmoment). Ein Maß für die Viskosität ergibt sich aus der Steigung der Sol-Kurve.

¹⁴ Vgl. DIN 1342-1, 2003, S. 5/13.

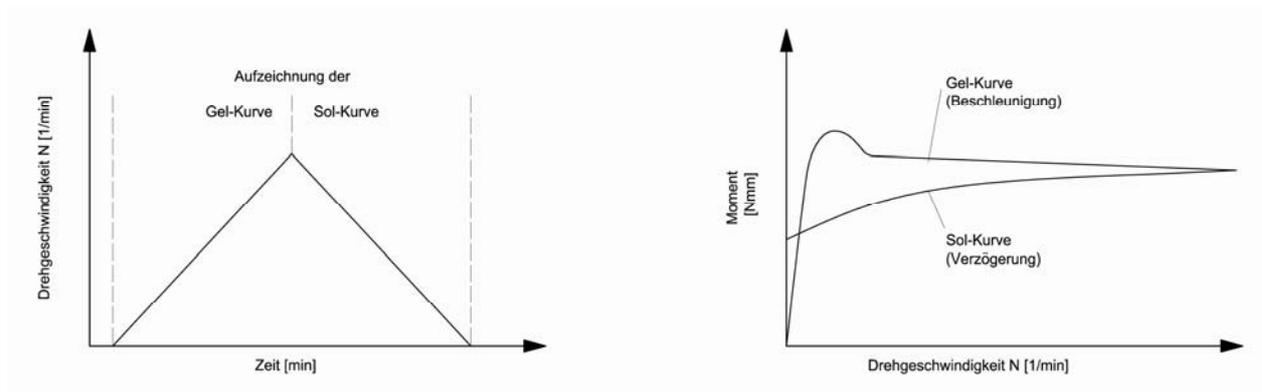


Abbildung 4-6: Messprofil (links), qualitative Fließkurve (rechts)

Mit den beiden Methoden Marshtrichter und Viskomat stehen für die Untersuchungen zwei Relativ-Messsysteme zur Verfügung, mit denen vergleichende Aussagen über das Fließverhalten infolge unterschiedlicher Materialzusammensetzung und -behandlung getroffen werden können. Da die Viskomatergebnisse eine genauere Interpretation zulassen, wird im Rahmen des Berichtes nur auf die gemessenen Fließmomente eingegangen. Die zu jeder Suspension zusätzlich ermittelten Marshzeiten dienen lediglich einer Qualitätskontrolle und ersten Einschätzung der Suspension, bilden jedoch keine Grundlage für eine Ergebnisanalyse.

4.1.1 Einfluss der Mischtechnik

Zum Mischen von Bentonit- oder Bentonit-Zementsuspensionen werden kolloidal aufschließende Mischsysteme eingesetzt, damit ein Verklumpen der feinen Bestandteile vermieden wird. Neben der Mischgeometrie hat auch die Mischzeit Einfluss auf die Qualität der Suspension. Im Vorfeld zu den eigentlichen Materialuntersuchungen werden daher die beiden Einflussgrößen Mischsystem und Mischzeit näher quantifizieren. Für die Versuche stehen zwei Mischer der Fa. MAT Mischanlagentechnik GmbH, Immenstadt, zu Verfügung:

- Suspensionsmischer SC – 05 - K
- Suspensionsmischer SC – 50 - K

Der Mischer SC – 05 – K ist als Labormischer für eine Suspensionsmenge von maximal fünf Litern ausgelegt. Zur Sanierung von kompletten Leitungsnetzen müssen bis zu 350 Liter vorgehalten werden, die mit dem SC – 50 – K mit einer Mischleistung von 50 Litern hergestellt werden.



Abbildung 4-7: Suspensionsmischer SC - 05 - K (links) und SC - 50 - K (rechts)

Der Einfluss von Mischdauer und Mischgeometrie wird für beide Suspensionsmischer mit dem Viskomat NT untersucht. Hierzu werden die Fließkurven einer reinen Bentonit-suspension, die mit 100 kg/m^3 Bentonit bei variierenden Mischzeiten angemischt wird, zu verschiedenen Zeitpunkten nach dem Mischende in einem Standardmessprofil erstellt und verglichen. Das Messprofil enthält eine Beschleunigungsphase von zwei Minuten, in der die Rotationsgeschwindigkeit von 0 U/min auf 120 U/min gesteigert wird. In der anschließenden Verzögerungsphase wird die Drehgeschwindigkeit des Messtopfes in zwei Minuten von 120 U/min auf 0 U/min zurückgefahren.

Beispielhaft für alle Fließkurven dieser Untersuchungsreihe wird in Abbildung 4-8 das Fließverhalten einer Suspension, die im SC – 50 – K hergestellt wurde, dargestellt. Die Fließkurven sind 5 Minuten nach dem Mischende bei einer Mischdauer von 10, 20 und 30 Minuten erstellt worden.

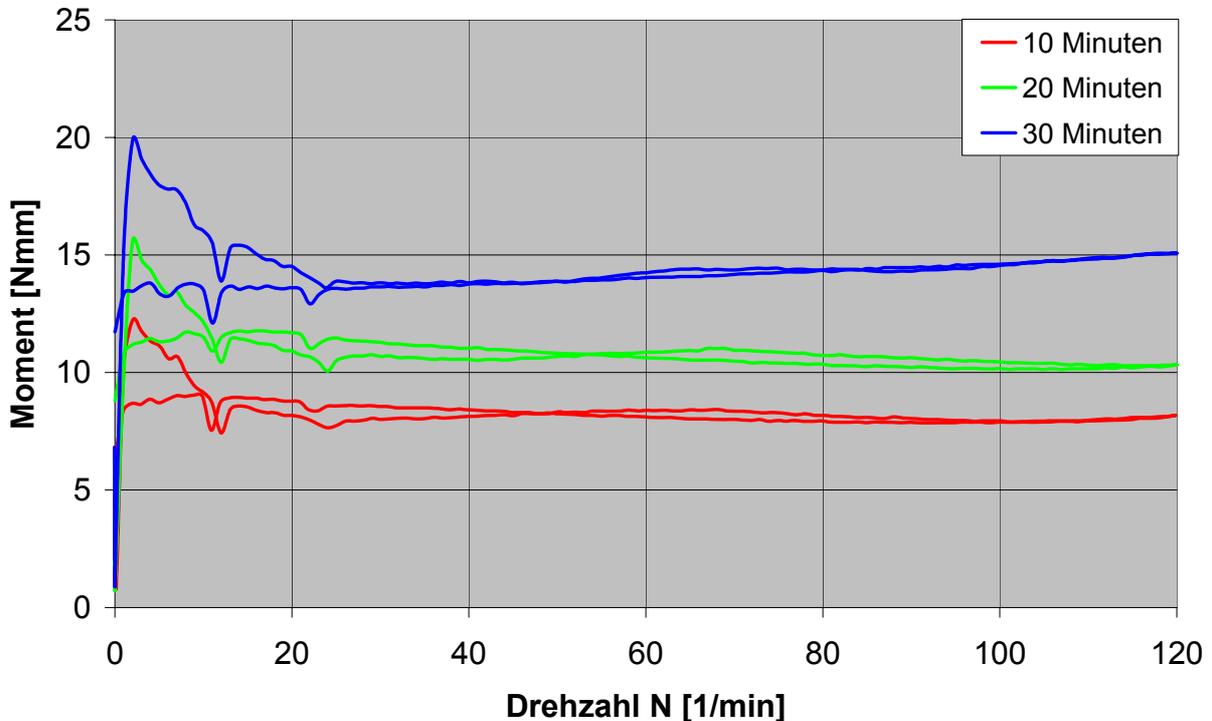


Abbildung 4-8: Fließkurven bei unterschiedlichen Mischzeiten

Bei allen drei Kurven ist die Hysterese mit einer Gel-Kurve und eine Sol-Kurve deutlich ausgeprägt. Die thixotrope Bentonitsuspension wird bei geringen Drehzahlen im Gel-Bereich geschert und verflüssigt und weist im Sol-Bereich ein annähernd lineares Verhalten auf. Die Messung des Drehmomentes ist bei Viskosimetern im sehr niedrigen Drehzahlbereich nur unzureichend genau. Daher wird für einen Vergleich der Fließmomente das Drehmoment bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 20 U/min auf der Sol-Kurve abgelesen (dynamisches Fließmoment). Für die drei Fließkurven ergeben sich somit in Abhängigkeit der Mischdauer folgende Fließmomente:

Tabelle 4-1: Fließmomente in Abhängigkeit der Mischdauer

Mischdauer [min]	dyn. Fließmoment [Nmm]
10	8,8
20	10,9
30	13,6

Die Untersuchungen zeigen, dass die Fließeigenschaften der Suspensionen in erheblichem Maße von der Mischdauer abhängen. Längere Mischzeiten führen zu einem besseren Aufschluss der Bentonitteilchen und erzeugen deshalb höhere Fließmomente. Neben dem Aufschluss durch einen kolloidalen Mischvorgang hat auch die Quellzeit nach dem Anmischen Einfluss auf die Fließeigenschaften. Hierbei wird Wasser in die Zwischenschichten der Bentonitplättchen eingelagert. Auf diese Weise kann die bei zu geringem Mischaufschluss nicht erreichte Qualität durch das Quellverhalten kompensiert werden.

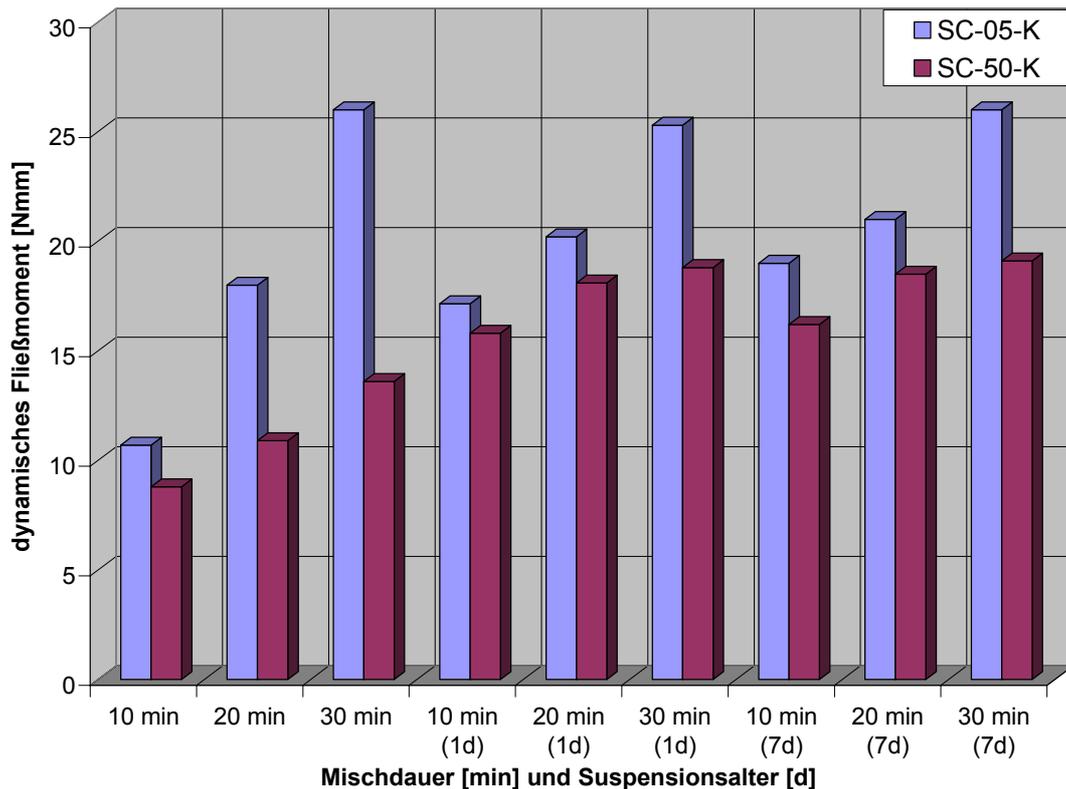


Abbildung 4-9: Vergleich der Mischer SC – 05 - K und SC – 50 - K

In Abbildung 4-9 ist eine Zusammenfassung der Mischeruntersuchungen dargestellt. Zum Vergleich der beiden Mischertypen werden die dynamischen Fließmomente aus den einzelnen Fließkurven gewonnen und je nach Mischdauer und Suspensionsalter gegeneinander aufgetragen.

Mit dem kleineren Mischertyp SC – 05 – K wird bei gleicher Mischdauer immer ein höheres Fließmoment und somit ein besserer Aufschluss erreicht. Jedoch wird durch die Messungen einen und sieben Tage nach dem Anmischen gezeigt, dass ein vollständiger Aufschluss bereits durch eine lange Mischdauer erreicht wird, und ein Nachquellen nur noch in geringem Maße auftritt. Beim SC – 50 – K hingegen wird selbst bei 30 min Mischdauer kein vollständiger Aufschluss erreicht. Erst nach einer Nachquellzeit von einem Tag stellt sich eine konstante Fließqualität ein. Weiterhin zeigen die Untersuchungen, dass ein Vergleich von Suspensionen, die mit verschiedenen Mixchern hergestellt werden, nur schwer

möglich ist. Für die weiteren Untersuchungen werden daher standardisierte Versuchsabläufe festgelegt. Um eindeutige Vergleichsmöglichkeiten zu erhalten, werden bei Laboruntersuchungen die Suspensionen mit dem SC – 05 – K nach einer zehninütigen Mischdauer direkt im Anschluss an den Mischvorgang im Viskomat NT analysiert. Für die praxisnahen Versuche mit großen Suspensionsmengen wird die reine Bentonitsuspension mindestens einen Tag vor der Versuchsdurchführung hergestellt.

4.1.2 Rheologische Untersuchungen an reinen Bentonitsuspensionen

Für die Anwendung als Injektionsmaterial sind die rheologischen Eigenschaften Stabilität und Fließfähigkeit von besonderer Bedeutung. Die Stabilität einer Suspension beschreibt die Eigenschaft, sich im Laufe der Zeit nicht oder möglichst wenig zu entmischen. Die Fließfähigkeit wird als Indikator für die Penetrationseigenschaften der Suspension herangezogen. Geringe Fließmomente begünstigen das Eindringvermögen der Sanierungssuspensionen.¹⁵

Während des Anmischens und auch während der Sanierung sind längere Stillstandszeiten für Teilmengen der Suspension nicht zu vermeiden. Damit sich diese unbewegten Bentonitsuspensionen nicht entmischen, muss die Stabilität bei der Materialzusammensetzung berücksichtigt werden. Der Entmischungsvorgang beruht auf der schwerkraftbedingten Sedimentation der Feststoffe in der Flüssigkeit. Als Folge nimmt die Dichte der Flüssigkeit im oberen Bereich ab und im unteren Bereich zu. Zur Bewertung der Stabilität wird das Absetzmaß einer Suspension im Standzylinder gemessen (s. Abbildung 4-10).



Abbildung 4-10: Nicht ausreichend stabile Bentonitsuspension

Als Injektionssuspension sollte die Ausbildung von Freiwasser einen Anteil von 2 % bezogen auf die gesamte Suspensionssäule innerhalb von einer Stunde nicht überschreiten.

¹⁵ An dieser Stelle wird auf Forschungsergebnisse vorgegriffen, die aus Gründen der Übersichtlichkeit erst später im Bericht erläutert werden. Für eine ausreichende Eindringfähigkeit sollte das dynamische Fließmoment auch nach längeren Ruhezeiten nicht über 5 Nmm liegen.

Reine Aktivbentonitsuspensionen erfüllen diese Anforderung bereits bei einer Bentonitzugabemenge von 40 kg/m^3 . Bei Calciumbentoniten werden mit mindestens 200 kg/m^3 erheblich mehr Feststoffmengen benötigt.

Das Fließverhalten wird ebenfalls maßgeblich durch die Bentonitart und die Dosierung bestimmt. Zur Untersuchung dieser Einflussgrößen werden Fließkurven unterschiedlicher Bentonite bei verschiedenen Bentonitdosierungen erstellt und miteinander verglichen. Das Messprofil zur Aufzeichnung der Fließkurven besteht aus vier Abschnitten mit jeweils einer Beschleunigungs- und einer Verzögerungsphase. Die Rotationsgeschwindigkeit wird gleichmäßig zwischen 0 U/min und 120 U/min verändert. Im letzten Abschnitt wird während der Verzögerungsphase bei einer Drehgeschwindigkeit von 20 U/min das dynamische Fließmoment ausgelesen. Im Folgenden werden die Fließkurven der Bentonitart Ibeco CT exemplarisch für alle Bentonite genauer untersucht.

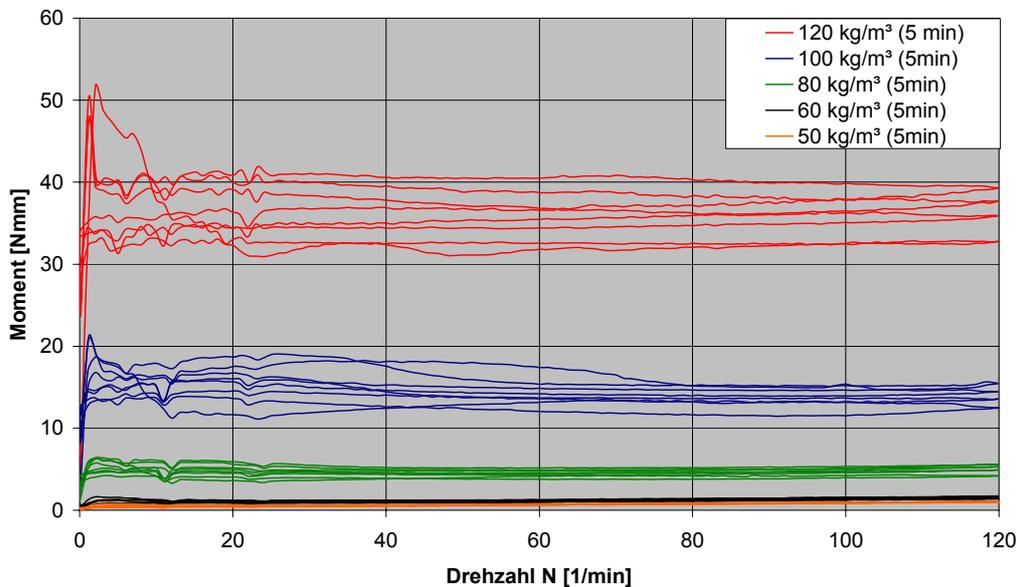


Abbildung 4-11: Fließkurven eines 5 Minuten alten Ibeco CT bei unterschiedlicher Dosierung

In Abbildung 4-11 sind die Fließkurven eines Ibeco CT bei unterschiedlicher Dosierung dargestellt. Die Bentonitsuspensionen wurden 10 Minuten lang im SC – 05 – K gemischt und die Fließkurven 5 Minuten nach dem Mischende aufgenommen. Die Dosierung variiert in einem Bereich von 50 kg/m^3 (Stabilitätsgrenze von Ibeco CT) bis 120 kg/m^3 . Wie zu erwarten war, bewirken hohe Feststoffgehalte größere dynamische Fließmomente. Wiederholungsversuche haben gezeigt, dass sich durch eine gezielte Dosierung die gewünschten Fließmomente und somit das Eindringvermögen in den anstehenden Boden einstellen lassen.

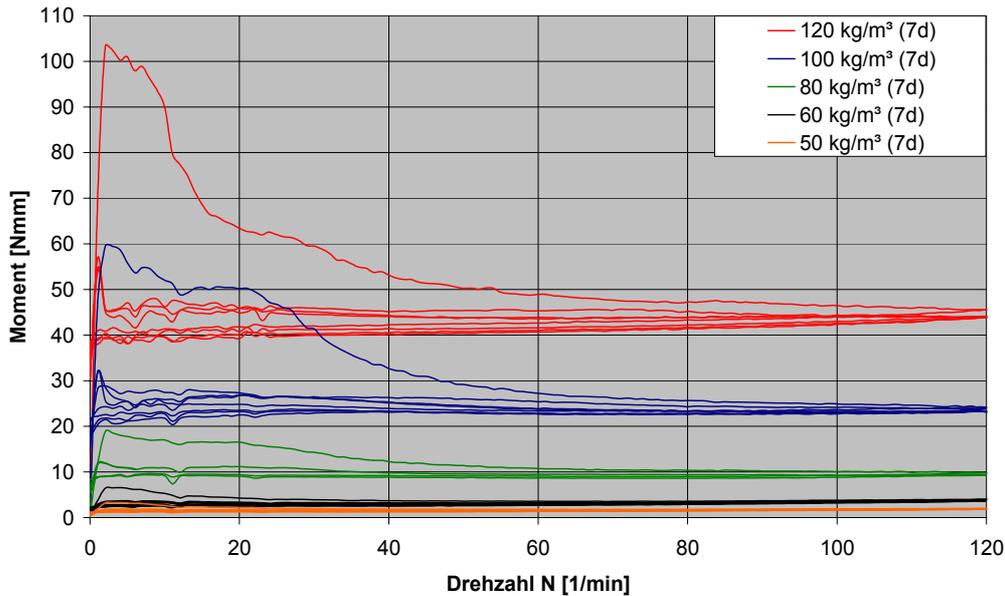


Abbildung 4-12: Fließkurven eines 7 Tage alten Ibeco CT bei unterschiedlicher Dosierung

In Abbildung 4-12 und Abbildung 4-13 werden die bereits untersuchten Bentonitsuspensionen nach einer Lagerzeit von 7 bzw. 28 Tagen nochmals im Viskomat geschert. Auch hier zeigt sich eine ausgeprägte Abhängigkeit zwischen der Dosierung und dem Fließverhalten.

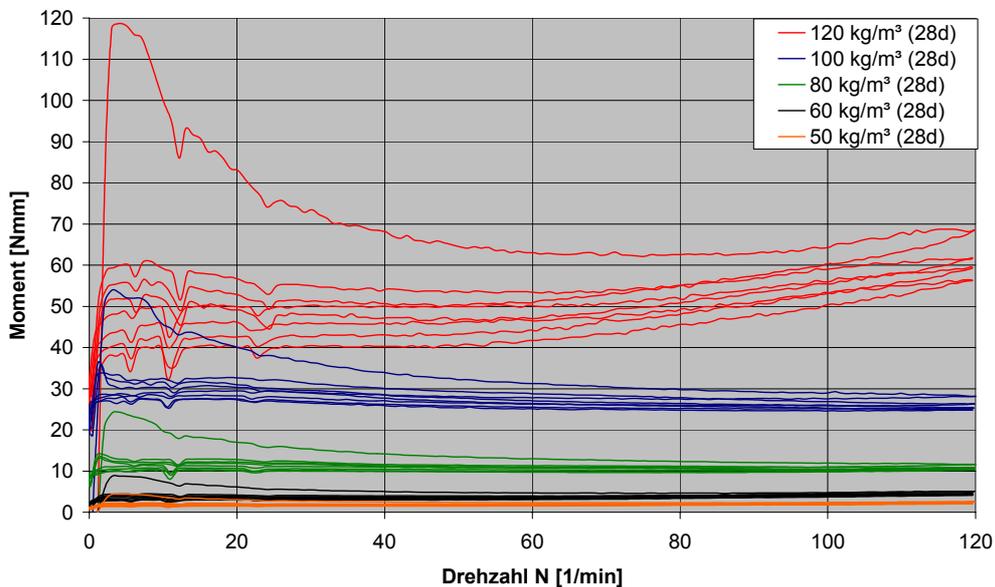


Abbildung 4-13: Fließkurven eines 28 Tage alten Ibeco CT bei unterschiedlicher Dosierung

Weiterhin lässt sich feststellen, dass durch die Lagerung eine Erhöhung der maximal gemessenen Fließmomente (Maximum auf der ersten Gel-Kurve) hervorgerufen wird. Dieses Phänomen tritt besonders zwischen der 5-Minuten- und 7-Tage-Messung auf und ist auf die Quelleigenschaften des Bentonits zurückzuführen. Zusätzlich muss hier die geringe Mischdauer von nur 10 Minuten bei dem Nachquellverhalten berücksichtigt werden (s. Ein-

fluss der Mischtechnik S. 25). Durch die Mischwirkung des Viskomaten wird jedoch ein vollständiger Bruch der kartenhausähnlichen Bentonitstruktur bewirkt, so dass die Gel- und Sol-Kurven nach der ersten Beschleunigungsphase annähernd auf gleichem Niveau liegen. In der Praxis vollzieht sich dieser Strukturbruch ebenfalls während der Sanierung durch den Einfüll- und Injektionsprozess. Eine Analyse der für den Injektionsvorgang maßgebenden Fließeigenschaft kann daher nur mit den dynamischen Fließmomenten erfolgen.

Ein Vergleich der Bentonitsorten mit verschiedener Dosierung und Lagerungsdauer (.s Abbildung 4-14) zeigt, dass die lagerungsbedingten Unterschiede in den Fließeigenschaften innerhalb einer Bentonitsorte durch den Strukturbruch relativ gering sind. Die Bentonitart und die Dosierung hingegen haben erheblich höheren Einfluss auf das dynamische Fließmoment. Für die Anwendung bedeutet dies, dass durch ein Aufmischen der Suspension die lagerungsbedingten Veränderungen der Fließeigenschaften weitgehend revidiert werden können, und über die Auswahl der Bentonitsorte und die Dosierung die gewünschte Fließeigenschaft gezielt eingestellt werden kann.

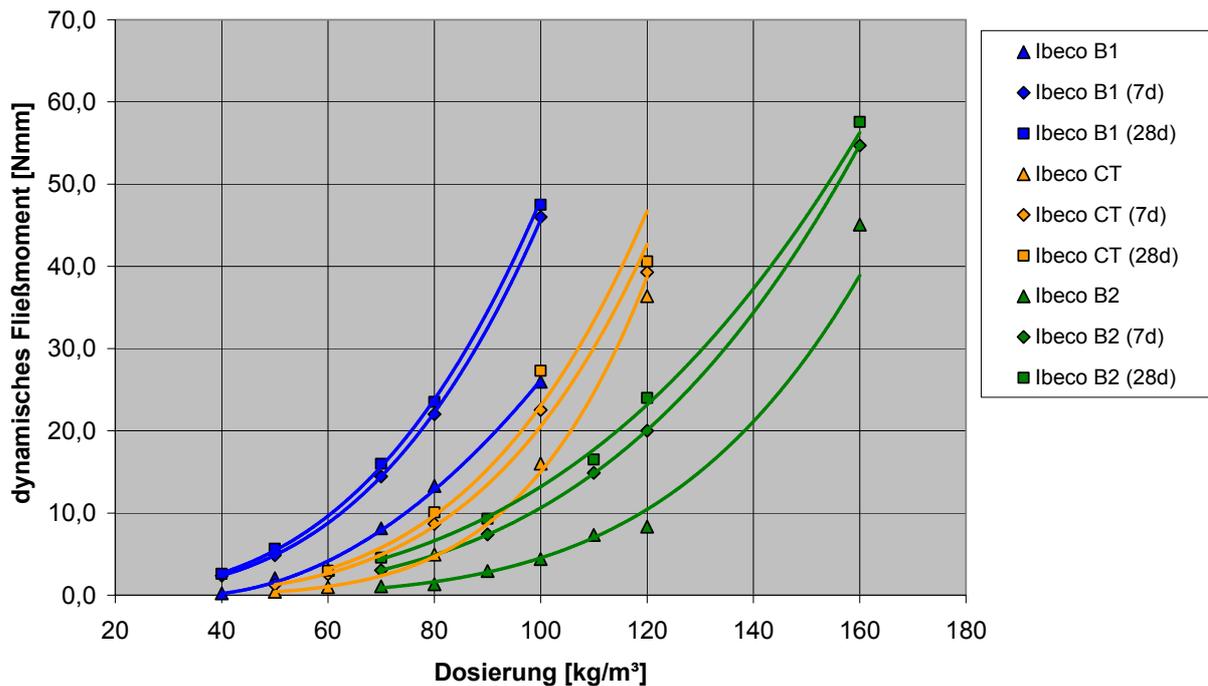


Abbildung 4-14: Dynamische Fließmomente von Natriumbentonit in Abhängigkeit der Dosierung und der Lagerzeit

Zur übersichtlicheren Darstellung werden die dynamischen Fließmomente des Calciumbentonits gesondert in der Abbildung 4-15 dargestellt. Die zuvor bei den Natriumbentoniten festgestellten Abhängigkeiten gelten auch für die höher zu dosierenden Calciumbentonite.

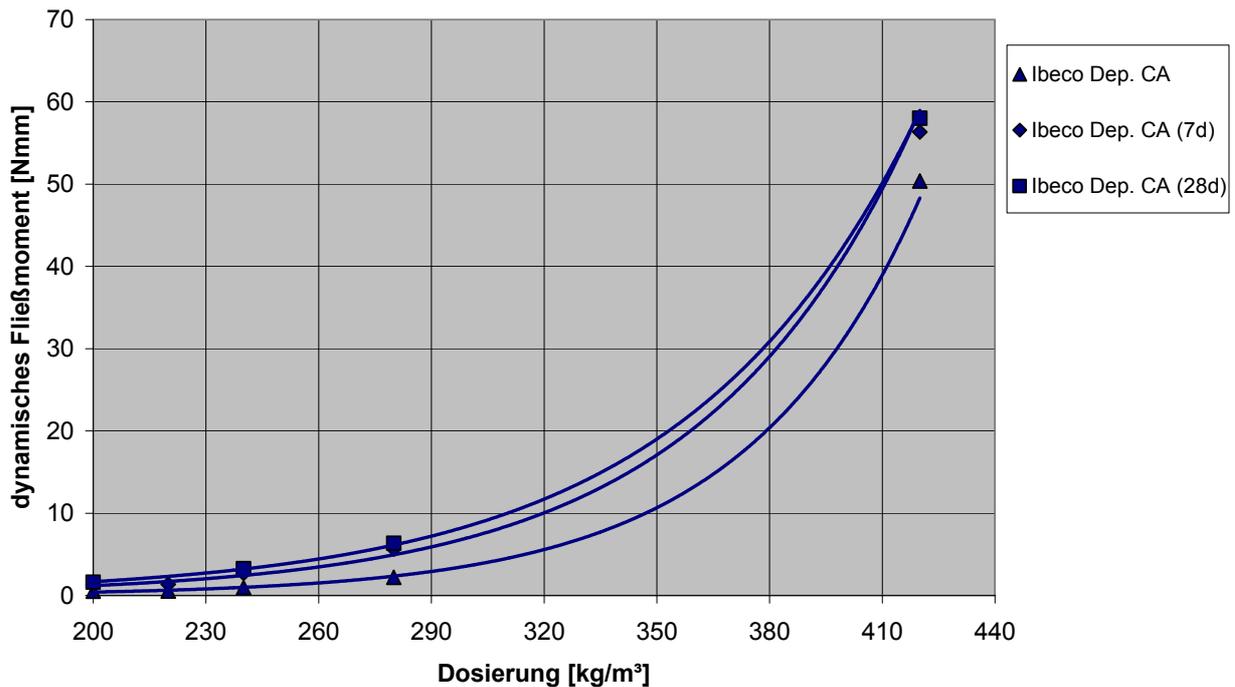


Abbildung 4-15: Dynamische Fließmomente von Calciumbentonit in Abhängigkeit der Dosierung und der Lagerzeit

4.1.3 Rheologische Untersuchungen an Bentonit-Zementsuspensionen

Die Untersuchungen an Bentonit-Zementsuspensionen sind in zwei aufeinander folgende Projektphasen unterteilt. Zunächst wurde das Forschungsvorhaben bei mehreren Herstellern mineralischer Bindemittel vorgestellt und die Produktpalette gemeinsam auf geeignete Injektionsmaterialien hin überprüft. Für eine anwendungsbezogene Erprobung sind die zwei Fertigprodukte Füllbinder L von der Fa. Schwenk Zement KG, Ulm, und Drill-mix von der Fa. Anneliese BUT, Ennigerloh, zu Verfügung gestellt worden. Während der rheologischen Untersuchungen stellte sich jedoch heraus, dass die Fertigprodukte nur bedingt zur Sanierung von GEA geeignet sind. Darauf hin wurden mit eigenen Rezepturen verschiedene Einflussgrößen in rheologischen Versuchsreihen analysiert und für die weiteren Untersuchungen geeignete Bentonit-Zementsuspensionen entwickelt.

4.1.3.1 Fertigprodukte

Die Fertigprodukte werden zunächst nach den Rezeptangaben des Herstellers angemischt. Da die Produkte eigentlich für ein Anwendungsgebiet konzipiert sind, in dem vornehmlich feststoffreiche Suspensionen benötigt werden, wird in weiteren Untersuchungen von den Rezeptvorgaben abgewichen und der Wasser-Feststoffwert (w/f-Wert) zur Steigerung der Fließfähigkeit erhöht. Die rheologischen Untersuchungen werden mit dem Viskomaten NT wieder nach der in Kapitel 4.1 (S. 26) beschriebenen Vorgehensweise

durchgeführt. Beispielhaft für beide Fertigprodukte werden im Folgenden die Ergebnisse für die selbsterhärtende Bohrspülsuspension Drill-mix vorgestellt.

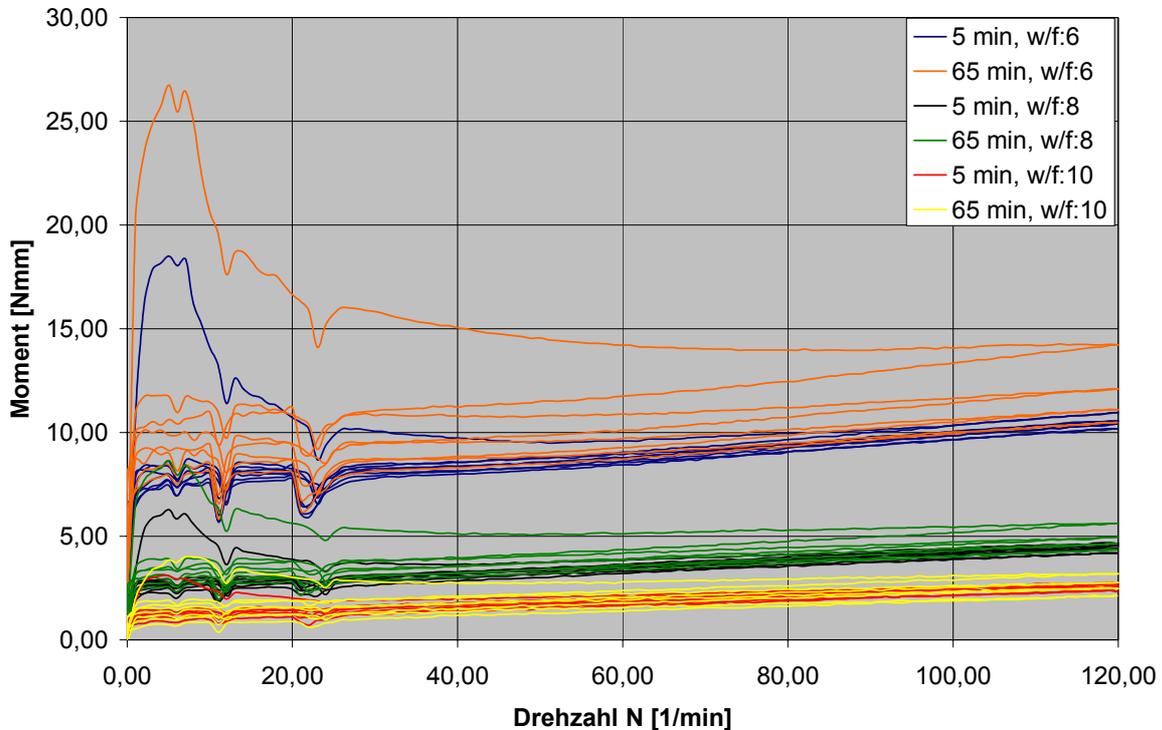


Abbildung 4-16: Rheologische Untersuchungen an dem Fertigprodukt Drill-mix

In Abbildung 4-16 sind Fließkurven dargestellt, die mit unterschiedlichen w/f-Werten jeweils 5 Minuten und 65 Minuten nach dem Mischende aufgezeichnet wurden. Der Hersteller empfiehlt eine Feststoffmenge von 160 kg/m^3 , die einen w/f Wert von ca. 6 ergibt. Um das Fließmoment zu verringern, sind auch Suspensionen mit w/f-Werten von 8 und 10 untersucht worden. Zwar ist es hierdurch möglich, ein gutes Eindringvermögen zu erreichen, allerdings sind die Suspensionen bei diesen geringen Feststoffmengen nicht mehr ausreichend stabil. Beim Füllbinder L traten die gleichen Probleme auf, so dass von weiteren Untersuchungen abgesehen wurde. Neben dem Stabilitätsproblem muss ebenfalls berücksichtigt werden, dass die Produkte für einen Einsatzbereich gedacht sind, in dem Hohlräume verfüllt werden sollen und ein weites Eindringen in den Untergrund gerade vermieden werden soll. Ein weiterer Gesichtspunkt ist die Festigkeitsausbildung der Suspensionen. Aufgrund des für die Eindringfähigkeit notwendigen geringen Zementgehaltes wird der Hydratationsprozess derart verlangsamt, dass die Festigkeit der ausgehärteten Suspensionen nicht zufriedenstellend ist.

Die rheologischen Untersuchungen an den Fertigprodukten ergeben somit, dass über die einzige Stellschraube W/f-Wert die hohen Anforderungen an eine erhärtende Sanierungssuspension nicht erfüllt werden können. Da von der Herstellerseite kein Einblick in die Rezepturen gewährt wird, ist eine „blinde“ Beimischung weiterer Bestandteile nicht sinnvoll,

so dass die Herstellung eigener Bentonit-Zementsuspensionen mit bekannter Rezeptur verfolgt wird. Auf diese Weise können die verschiedenen Einflüsse der einzelnen Bestandteile gezielt untersucht werden.

4.1.3.2 Eigene Bentonit-Zementmischungen

Die selbsterhärtenden Suspensionen nach eigenen Rezepten werden aus verschiedenen festen und flüssigen Komponenten zusammengesetzt. Um den Einfluss des jeweiligen Materials zu untersuchen, wird unter Beibehaltung der Dosierung aller übrigen Bestandteile die Zugabemenge variiert. Die standardmäßige Zusammensetzung, die sich in Folge mehrerer Vorversuche als sinnvoller Mittelwert ergeben hat, sieht wie folgt aus:

- 20 kg/m³ Bentonit
- 200 kg/m³ Zement (Mikrodur R-U)
- 0 kg/m³ Flugasche
- 0 kg/m³ Stärke
- 4 % Injektionshilfe (bezogen auf den Zementgehalt)

Um Einflüsse aus weiteren Randbedingungen zu vermeiden, werden die Suspensionen immer mit 20°C warmen Leitungswasser in dem Mischer SC – 05 – K bei einer Bentonitmischdauer von 10 min und einer Zementmischdauer von 5 min hergestellt. Die Komponenten werden dabei in der Reihenfolge Bentonit, Fließmittel oder Stärke, Zement und Flugasche zugegeben.

Zunächst werden der Einfluss und die notwendige Menge Bentonit untersucht. Die Aufgabe des Bentonits in einer Bentonit-Zementsuspension besteht nicht, wie bei reinen Bentonitsuspensionen, in der Abdichtwirkung der feinen Bentonitplättchen, sondern hauptsächlich dient Bentonit zur Stabilisierung der Gesamtsuspension. Die Abdichtung erfolgt bei Bentonit-Zementsuspensionen über die Hydratation des Zementes. In Absetzversuchen hat sich gezeigt, dass Suspensionen mit einem Zementgehalt von 100 kg/m³ bereits bei einem Bentonitgehalt von 20 kg/m³ ausreichend stabil sind. Wird der Zementanteil erhöht, sind die Absetzerscheinungen noch geringer, da feststoffreichere Suspensionen leichter zu stabilisieren sind. Der Bentonitanteil wird für alle weiteren Versuche zu 20 kg/m³ festgelegt, da eine unnötige Erhöhung zwar eine größere Sicherheit gegen Entmischen bietet, sich jedoch kontraproduktiv auf die Fließfähigkeit und die Festigkeit der erhärteten Suspension auswirkt.

Die rheologischen Untersuchungen zu den Auswirkungen der Zementfraktion werden nach den Fragestellungen „Einfluss der Zementsorte“, „Einfluss des Zementgehaltes“ und „Einfluss von Zusatzstoff und Zusatzmitteln“ unterteilt. Als messbare Vergleichsgröße wird wie-

der die zeitliche Entwicklung des dynamischen Fließmomentes aus den Viskomatversuchen genutzt. Die Fließmomente werden mit dem aus den Bentonituntersuchungen bekannten Messprofil zu den Zeitpunkten 5 min, 65 min, 125 min, 245 min und 356 min nach dem Mischende aufgezeichnet.

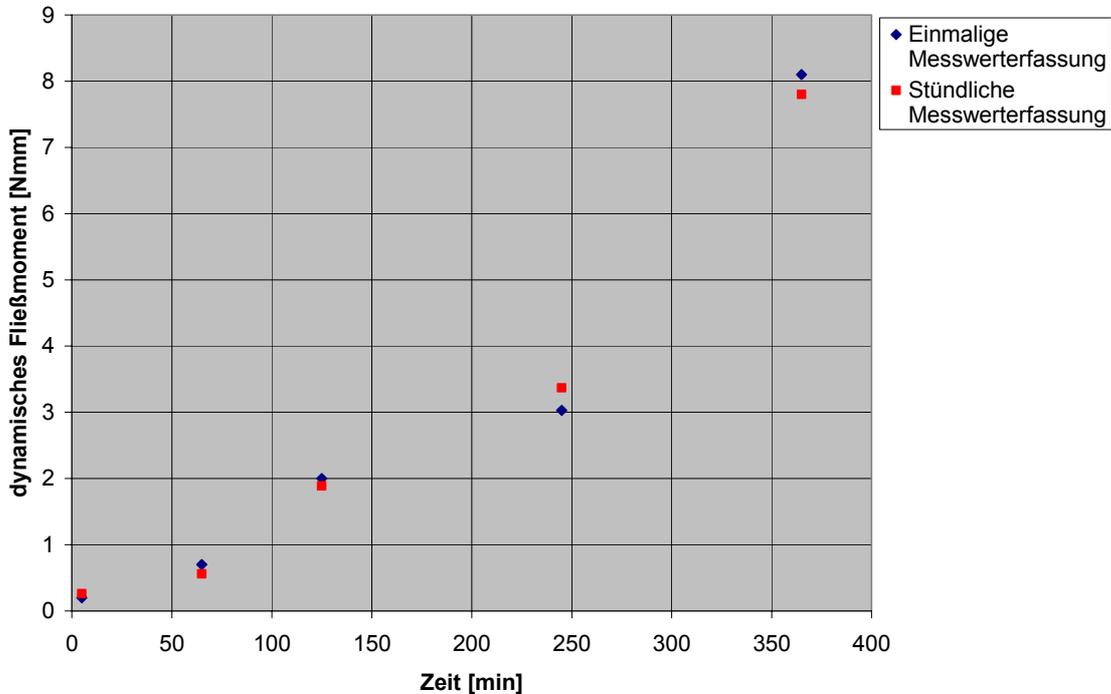


Abbildung 4-17: Vergleich zur Vorgehensweise bei der Messwertaufnahme

Zur Beschleunigung der Versuchsdurchführung werden die Messungen zu den verschiedenen Zeitpunkten mit derselben Suspension nacheinander durchgeführt. Anhand der Abbildung 4-17 kann gezeigt werden, dass eine möglicherweise unberücksichtigte Verfälschung aufgrund dieser Vorgehensweise nur marginal ist. Verglichen werden hier die dynamischen Fließmomente, die sich einerseits jeweils einzeln zu den Messzeitpunkten ergaben, ohne die Suspension bei einer vorangegangenen Messung zu durchmischen und andererseits nach dem oben beschriebenen Versuchsablauf. Da bei jedem Messvorgang durch die Rotation ein Strukturbruch stattfindet und das dynamische Fließmoment erst zum Ende der Messung bestimmt wird, ergeben sich in dem betrachteten Zeitraum nur geringe Unterschiede.

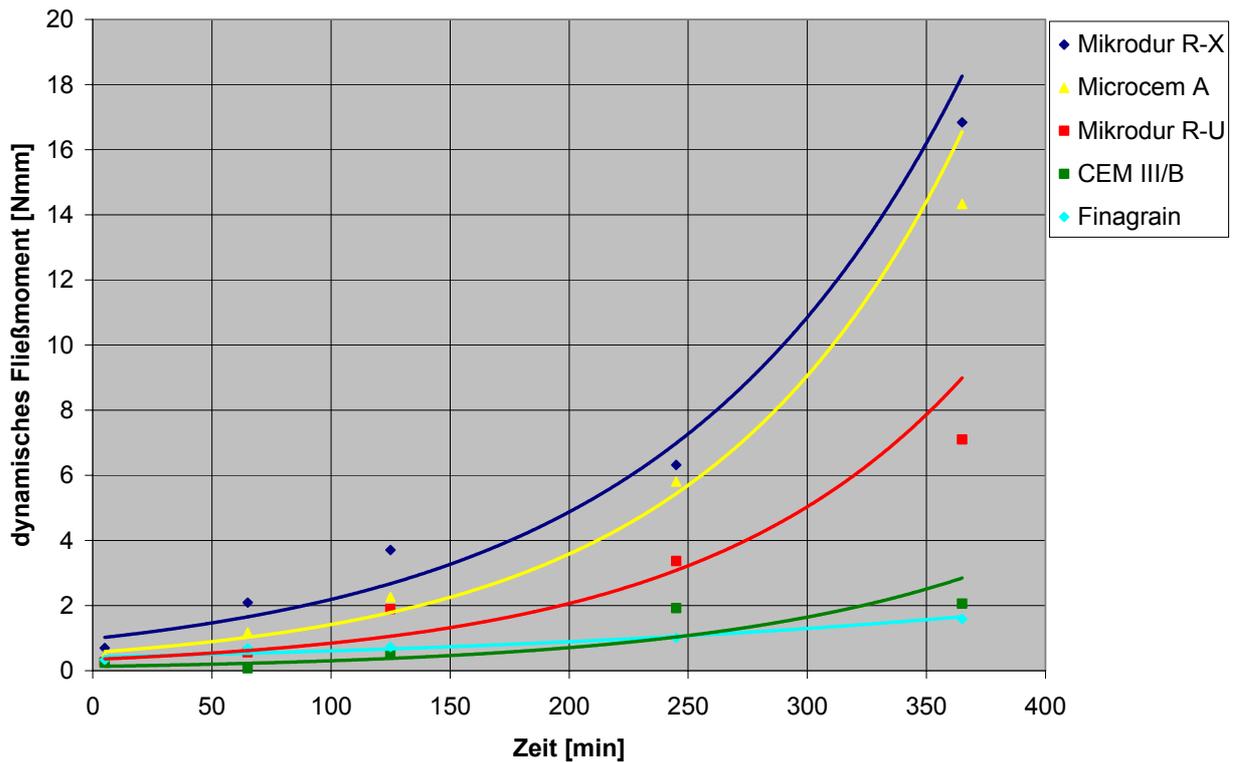


Abbildung 4-18: Einfluss der Zementsorte

In Abbildung 4-18 werden die Ergebnisse der Viskomatversuche an den verschiedenen Zementsorten dargestellt. Grundsätzlich bewirkt der Hydratationsprozess einen Anstieg des dynamischen Fließmomentes und somit eine Verschlechterung der Fließeigenschaften. Das schnellste Abbindeverhalten zeigt sich bei dem Feinstzement Mikrodur R-X. Durch die hohe Mahlfineinheit und die damit verbundene große Oberfläche binden Feinstzemente in der Regel schneller ab als Standardzemente. Der Feinstzement Microcem A liegt nur knapp unterhalb des Mikrodur R-X. Einerseits ist er mit einem d_{95} von $8 \mu\text{m}$ zwar etwas gröber als der Mikrodur R-X ($d_{95} = 6,5 \mu\text{m}$), andererseits wird Microcem A auf der Basis von Portlandzement hergestellt, während bei Mikrodur R-X Hochofenzement verwendet wird. Da Portlandzemente schneller abbinden als Hochofenzemente, überlagern sich die beiden Effekte Mahlfineinheit und Basiszementsorte bei beiden Produkten. Deutlich unterhalb der beiden ersten Zemente liegt die Kurve des immer noch zu den Feinstzementen zählenden Mikrodur R-U. Mit einem d_{95} im Bereich vom Microcem A zeigt sich jetzt deutlich der Einfluss der Hochofenzementbasis von Mikrodur R-U. Der Standardzement CEM III/B vereint die beiden Aspekte geringe Mahlfineinheit und Hochofenzement und liegt deshalb erwartungsgemäß unter den bisher beschriebenen Zementsorten. Eine unerwartete Ausnahme bildet der Feinstzement Finagrain. Da dieser Zement aus CEM I - Zement, also Portlandzement, hergestellt wird und eine viel höheren Mahlfineinheit ($d_{95} = 20 \mu\text{m}$) besitzt, wäre ein Kurvenverlauf oberhalb des CEM III/B ($d_{95} = 80 \mu\text{m}$) zu erwarten gewesen. Auf Nachfrage beim Hersteller Anneliese BUT stellte sich heraus, dass Finagrain von Haus aus mit einem verzögernden Additiv versehen ist, was den zunächst unplausiblen Kurvenverlauf erklärt. Zusammenfassend lässt sich für alle

Zementsorten festhalten, dass in den ersten 2 Stunden nach dem Anmischen der Suspension keine erheblichen Unterschiede infolge der unterschiedlichen Hydratationsgeschwindigkeit auftreten. Wenn für die Sanierung von großen GEA mehr Zeit benötigt wird, ist dies bei der Auswahl der Zementsorte zu berücksichtigen.

Zur Bestimmung der Auswirkung der Zementdosierung auf die Fließfähigkeit werden die Versuche im Viskomat nach dem gleichen Versuchsablauf durchgeführt, der zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Zementsorten angewandt wurde. Mit der Zementsorte Mikrodur R-U werden Zugabemengen von 100 kg/m^3 , 150 kg/m^3 , 200 kg/m^3 , 300 kg/m^3 und 400 kg/m^3 getestet.

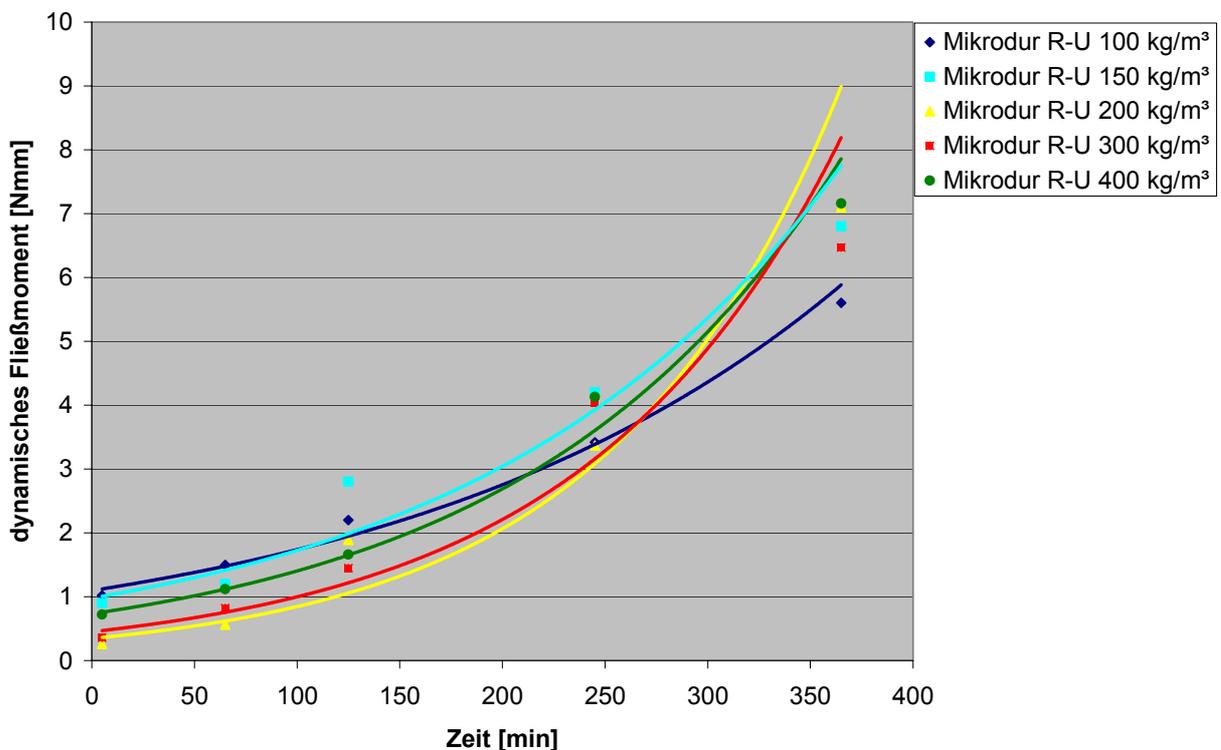


Abbildung 4-19: Einfluss des Zementgehaltes

Die Abbildung 4-19 zeigt, dass in einem Zeitraum von 6 Stunden nach dem Anmischen kein wesentlicher Einfluss von der Zementdosierung auf die Fließeigenschaften der Suspension ausgeht. Obwohl durch eine höhere Zementdosierung grundsätzlich eine Beschleunigung der Hydratation hervorgerufen wird, bewirkt die prozentual an die Gesamtzementzugabemenge gebundene Injektionshilfe eine weitgehende Unabhängigkeit der Fließeigenschaften vom Zementgehalt. Die Injektionshilfe hat neben der Verbesserung der Fließfähigkeit auch eine erstarrungsverzögernde Wirkung. Durch die in den Versuchsreihen generell vorgenommene Kopplung des Injektionshilfeanteils an den Zementgehalt unterliegt die Zementdosierung im Sanierungsfall keinen einschränkenden rheologischen Bedingungen.

Die selbsterhärtende Sanierungssuspension sollte über einen möglichst langen Zeitraum verarbeitbar sein und daher einem langsamen Erstarrungsprozess unterliegen. Eine aus der Betontechnologie bewährte Methode der Erstarrungsregelung ist die Substitution von Zement durch Flugasche. Der puzzolanische Zusatzstoff Flugasche bildet während der Zementreaktion mit den Hydratationsprodukten des Zementes eigene zementsteinähnliche Strukturen. Neben einem finanziellen Vorteil bewirkt der Austausch von Zement durch Flugasche eine Verlangsamung der Reaktion.

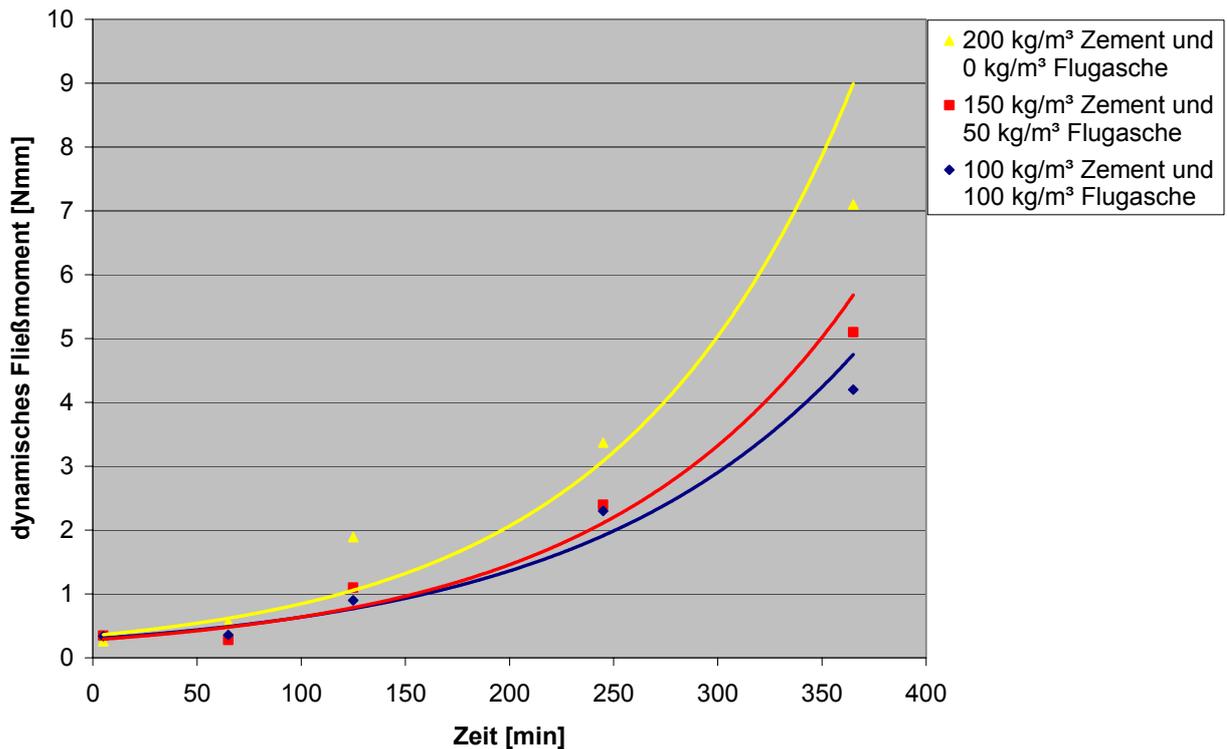


Abbildung 4-20: Einfluss des Zusatzstoffes Flugasche

Abbildung 4-20 verdeutlicht die Wirkung der Bindmittelsubstitution, indem der Zementgehalt von 200 kg/m³ zunächst durch 25 % Flugasche und dann durch 50 % Flugasche ersetzt wird. Die angestrebte Verzögerung kann mit Hilfe von Flugasche erreicht werden, jedoch sind die Auswirkungen erst ab etwa 3 Stunden hoch genug, dass sie im Rahmen einer Anwendung nützlich sein könnten. Ein wesentlicher Unterschied in der Substitution von 25 % oder 50 % wird erst ab 5 Stunden deutlich. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass bei den Versuchen eine Injektionshilfzugabemenge von 4 % bezogen auf den gesamten Bindemittelgehalt (Zement + Flugasche) ebenfalls einen verzögernden Einfluss auf die Flugasche hat, so dass der Wirkungszeitpunkt der Flugasche nach hinten verschoben ist. Da bei der Sanierung das Abbindeverhalten in den ersten Stunden maßgeblich durch die Injektionshilfe geregelt werden kann, ist der Einsatz von Flugasche nur noch aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten heraus sinnvoll.

Zur Untersuchung der Wirkung von Zusatzmitteln wird zunächst auf den thixotropierenden und stabilisierenden Einsatz von Stärke eingegangen. Über einen geringen Zusatz von Stärke soll versucht werden, den auf die gesamte Feststoffmenge bezogenen relativ hohen Anteil des Bentonits zu ersetzen. Normalerweise wird Stärke im Promillebereich bezogen auf das Bindemittel zugegeben. Bereits die ersten Versuche zeigen jedoch, dass bei sehr wässrigen Suspensionen geringe Stärkemengen keinerlei stabilisierende Wirkung besitzen. In Absetzversuchen kann eine ausreichende Stabilität erst ab 30 kg/m^3 bei einer Zementsuspension mit 200 kg/m^3 Zement erreicht werden. Durch so hohe Zugabemengen wird die Hydratation des Zementes außerdem extrem verschlechtert. Da Bentonit als Stabilisator nicht durch Stärke zu ersetzen ist und das Abbinden des Zementes verhindert wird, wird der Einsatz von Stärke nicht weiter verfolgt.

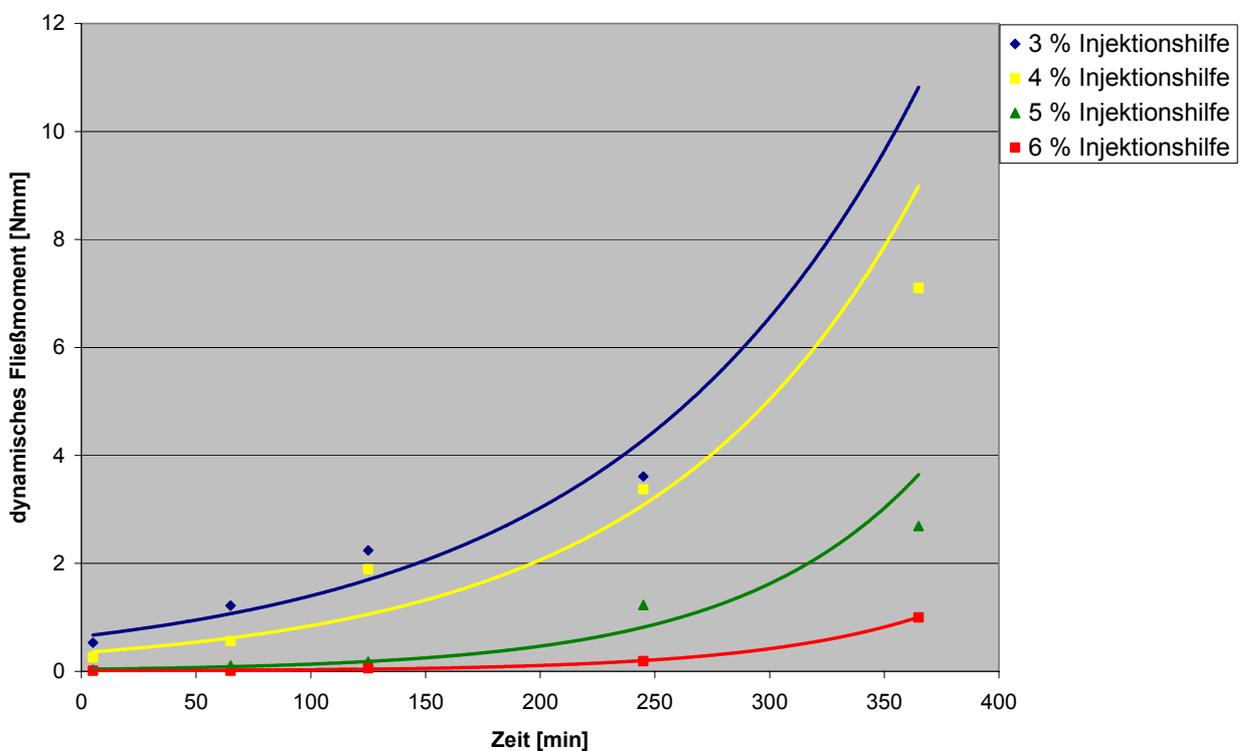


Abbildung 4-21: Einfluss des Zusatzmittels Injektionshilfe

Abbildung 4-21 zeigt, dass über den Einsatz von Injektionshilfe bereits bei geringen Zugabemengen sehr hohe Wirkungen erzielt werden können. Die Suspension kann so sehr verflüssigt werden, dass selbst nach 6 Stunden nur sehr geringe Widerstandsmomente gemessen werden. Über die Dosierung von Injektionshilfe lässt sich die Sanierungssuspension sehr einfach in ihrer Fließfähigkeit den jeweiligen Bodenverhältnissen anpassen. Eine Überdosierung führt allerdings auch zum fast vollständigen Verlust einer Fließgrenze und kann dazu führen, dass die Suspension in sehr großen Mengen unkontrollierbar in das Erdreich eindringt oder nach dem Abpumpen wieder durch die Schadstelle in die Rohrleitung zurückfließt. Weiterhin wird durch den Hersteller darauf hingewiesen, dass

eine zu hohe Dosierung negative Auswirkungen auf die Endfestigkeit haben kann (s. Kapitel 4.3).

4.2 Penetrationseigenschaften

Die in Kapitel 4.1 vorgenommenen Untersuchungen dienten dazu, die Eigenschaften des Injektionsmaterials im Hinblick auf dessen Fließfähigkeit zu beschreiben. Während bisher die Sanierungssuspension im Vordergrund stand, soll durch die Penetrationsversuche der Zusammenhang zwischen der Fließfähigkeit und dem Eindringvermögen in verschiedene Bodenarten näher untersucht werden. Da im Sanierungsfall die Durchlässigkeit des rohrumgebenden Bodens sehr unterschiedlich sein kann, müssen sowohl das Injektionsmaterial als auch die Verfahrenstechnik individuell angepasst werden können.

4.2.1 Einfluss der Sanierungssuspension

Für die Untersuchung des Eindringverhaltens der Suspensionen unter wechselnden Randbedingungen werden mit folgendem Versuchsaufbau (s. Abbildung 4-22) Durchflussmessungen vorgenommen.

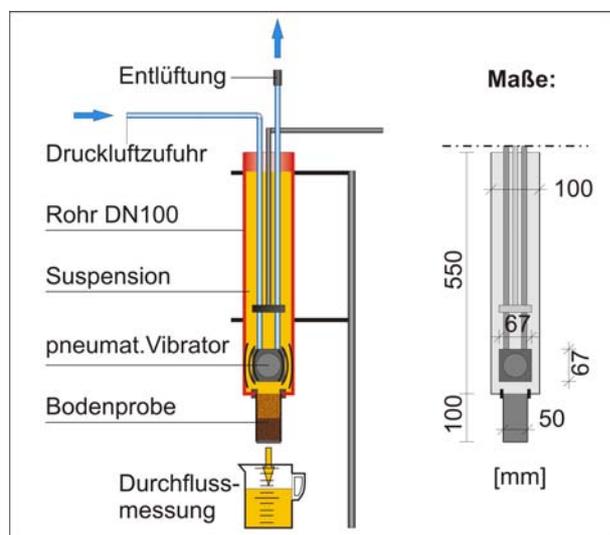


Abbildung 4-22: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Eindringverhaltens

Zu diesem Zweck werden die Suspensionen in ein Standrohr (DN 100) gefüllt, an dessen unterem Ende jeweils Bodenproben mit unterschiedlichen Kornverteilungslinien (z. B. Böden mit und ohne Schluffkornanteil) eingebaut sind. Nach dem Einschalten eines pneumatischen Vibrators (Druckluft-Kugelvibrator Typ NCB, s. Abbildung 3-4, S. 14) kann der Durchfluss der Suspension durch die Bodenprobe in Abhängigkeit der Materialzusammensetzung bestimmt werden. Anschließend werden die Bodenproben inklusive des umge-

benden Stahlrohres ausgebaut, sieben Tage im Klimaraum (20°C, 65 % Luftfeuchtigkeit) gelagert und danach auf ihre Wasserdichtheit (Prüfdruck 0,05 bar) geprüft.

4.2.1.1 Durchflussmessungen an reinen Bentonitsuspensionen

Die Durchflussuntersuchungen an den reinen Bentonitsuspensionen werden mit zwei verschiedenen Normsanden nach DIN 1164 und nach DIN EN 196-1 durchgeführt. Während der Normsand nach DIN 1164 als ein grober Prüfsand mit einer steilen Sieblinie im grobsandigen Bereich einzuordnen ist, deckt der feinere Normsand nach DIN EN 196-1 mit einer gestuften Sieblinie den gesamten Sandkornbereich ab. In der Versuchsreihe werden die Durchflüsse der vier Bentonitsorten bei beiden Bodenarten in jeweils mindestens 2 Versuchen bestimmt. Die Dichtheitsprüfung an der sanierten Bodenprobe wird im selben Versuchsaufbau mit einer Druckhöhe von 0,5 m durchgeführt.

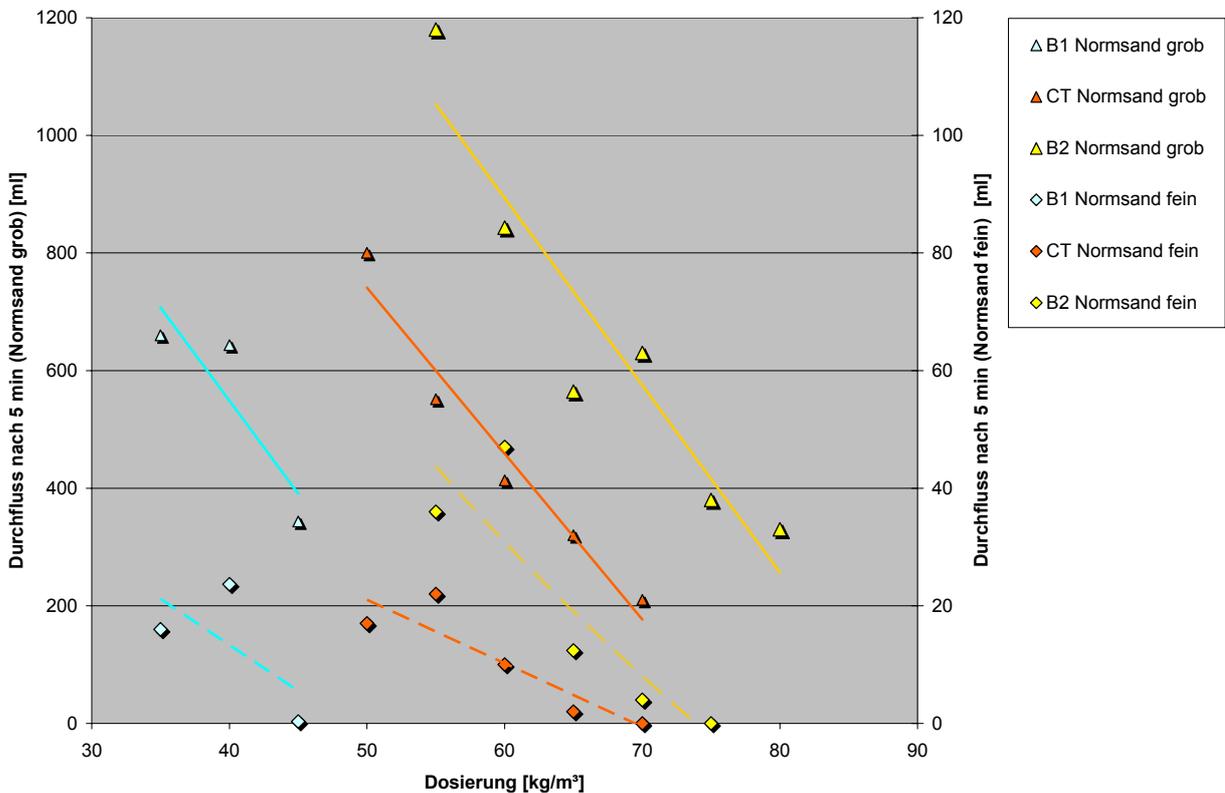


Abbildung 4-23: Durchflussergebnisse der Natriumbentonit-Suspensionen

In Abbildung 4-23 sind die Durchflussergebnisse der Natriumbentonite Ibeco B1, Ibeco CT und Ibeco B2 in Abhängigkeit der Dosierung für den groben und den feinen Normsand dargestellt. Auf der x- Achse werden die Dosierungen für jede Bentonitart in dem Bereich variiert, der zuvor auch rheologisch untersucht wurde. Auf der rechten y-Achse sind die Durchflussmengen abgebildet, die sich nach 5 min Vibration in dem groben Normsand ergeben haben. Auf der linken y- Achse sind die Durchflüsse für den feinen Normsand dargestellt. Die Skaleneinteilung der beiden Ordinaten unterscheidet sich um den Faktor

10. Die Durchflüsse in grobem Normsand werden für die jeweilige Bentonitsorte mit einer durchgezogenen Linie approximiert und in feinem Normsand mit einer gestrichelten Linie. In der gleichen Darstellungsform werden in Abbildung 4-24 die Ergebnisse für den Calciumbentonit Ibeco Deponit CA veranschaulicht.

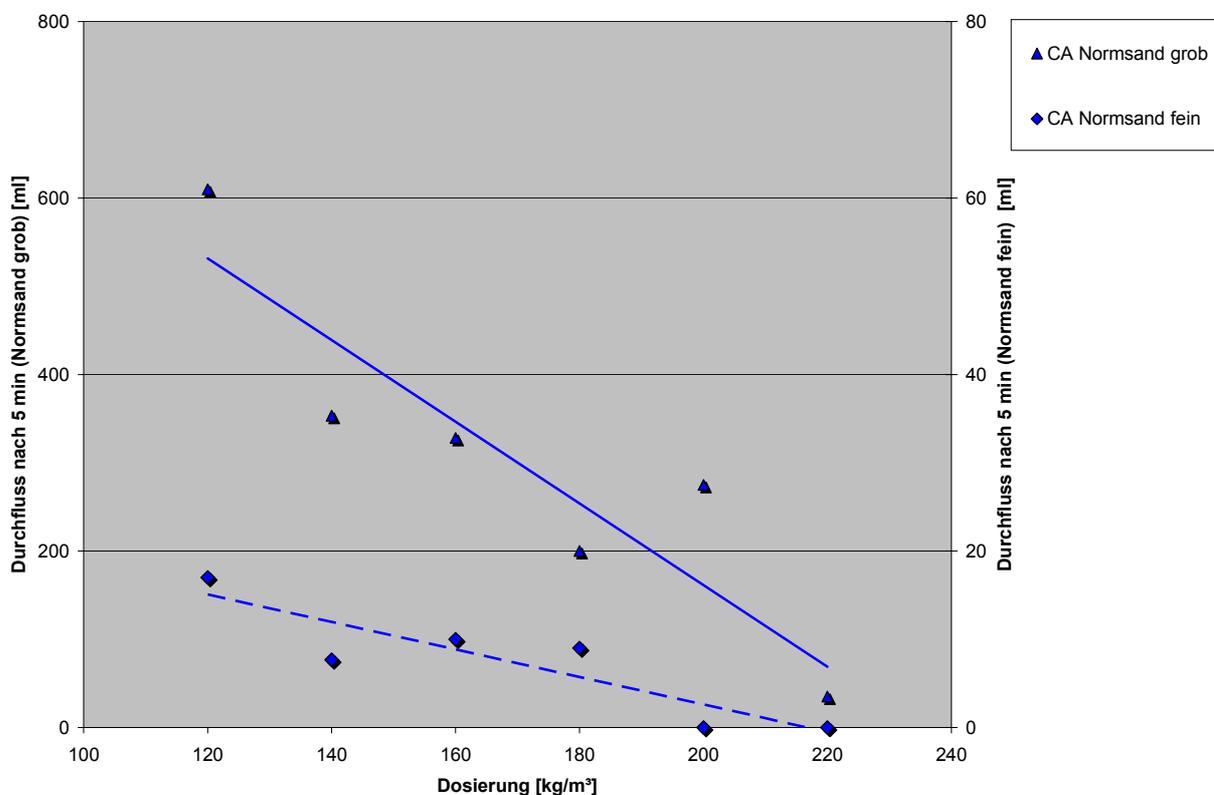


Abbildung 4-24: Durchflussergebnisse der Calciumbentonit-Suspension

Wie zu erwarten war, ist die Eindringfähigkeit in ein grobes Bodengefüge weitaus besser, als in dicht gelagerten feinsandigeren Böden. Obwohl die Durchflussmengen für die beiden Bodenarten um mehr als den Faktor 10 voneinander abweichen, liegen die Grenzdosierungen, bei denen kein Durchfluss mehr gemessen wird, nah beieinander. So ergibt sich z.B. für den Ibeco CT in dem feinen Normsand eine Grenzdosierung von 70 kg/m^3 und durch eine Extrapolation der Messwerte im groben Normsand einen Wert von nur ca. 76 kg/m^3 (s. Abbildung 4-23). Dies bedeutet für die Anwendung, dass trotz erheblicher Unterschiede in der Durchlässigkeit des Bodens die Bentonitdosierung und somit auch die Fließigenschaften an der Obergrenze nur geringfügig variiert werden können, um ein Eindringen in Boden noch zu gewährleisten. Wird hingegen eine zu wässrige Suspension eingesetzt, ist der Feststoffeintrag zu gering, und es kann keine ausreichende Stützwirkung im Porenraum erzielt werden. Dieses Phänomen wird anhand der Wasserdichtheitsprüfung der sanierten Bodenproben mit dem groben Normsand deutlich (s. Abbildung 4-25). Die Proben werden zwar alle vollständig von der Bentonitsuspension durchflossen, jedoch zeigt sich gerade bei den feststoffarmen Suspensionen, dass durch den Wasserdruck der Dichtheitsprüfung der Porenraum wieder freigespült wird. Die Injektionen in die feinen Normsandproben sind dagegen allesamt dicht, obgleich wesentlich geringere Durchflussmengen auftreten. Bei der Sanierung mit reinen Bentonitsuspensionen muss

demnach für eine ausreichende Abdichtwirkung das Injektionsmittel so auf das Porengefüge abgestimmt werden, dass auf der einen Seite genug Material injiziert werden kann aber auf der anderen Seite die Strukturbildung durch die Bentonitplättchen so hoch ist, dass die Suspension dem anstehenden Wasserdruck widerstehen kann.

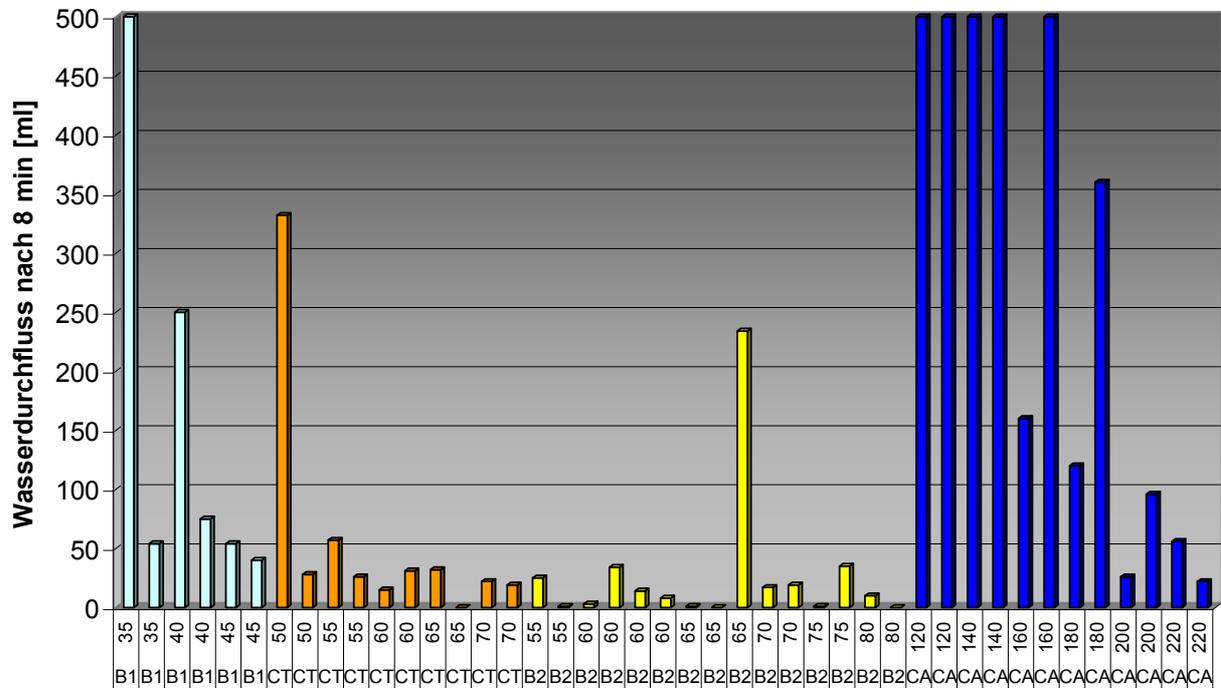


Abbildung 4-25: Dichtheitsprüfung der Durchflussproben in grobem Normsand¹⁶

Auf Basis der in den Vorversuchen gewonnenen Ergebnisse wird in den weiteren Untersuchungen nur noch der Bentonit Ibeco CT eingesetzt, da er im Verhältnis zu den anderen Bentoniten bei den Durchflussversuchen die höchst Reproduzierbarkeit aufweist und das dynamische Fließmoment weitgehend unabhängig von einer Nachquellzeit über die Dosierung gesteuert werden kann (s. Abbildung 4-14).

4.2.1.2 Durchflussmessungen an Bentonit-Zementsuspensionen

Die Untersuchungen zur Eindringfähigkeit von Bentonit-Zementsuspensionen werden wieder, wie bereits bei den rheologischen Untersuchungen, an folgenden Fragestellungen ausgerichtet:

- Einfluss der Zementsorte
- Einfluss der Zementdosierung
- Einfluss des Zusatzstoffes Flugasche
- Einfluss des Zusatzmittels Injektionshilfe

¹⁶ Ab einem Wasserdurchfluss größer 500 ml wurde die Prüfung bereits vor Ablauf der 8 Minuten abgebrochen und 500 ml als Ergebnis eingetragen.

Versuchsaufbau und –ablauf werden von den Durchflussmessungen an reinen Bentonit-suspensionen übernommen (s. Abbildung 4-22). Bei den Prüfsanden wird jedoch der grobkörnige Normsand nach DIN 1164 durch einen feinkörnigen Mauersand ersetzt, der in seiner Kornverteilung weitgehend dem Normsand nach DIN EN 196-1 entspricht, allerdings einen höheren Schluffkornanteil aufweist (s. Abbildung 4-26).

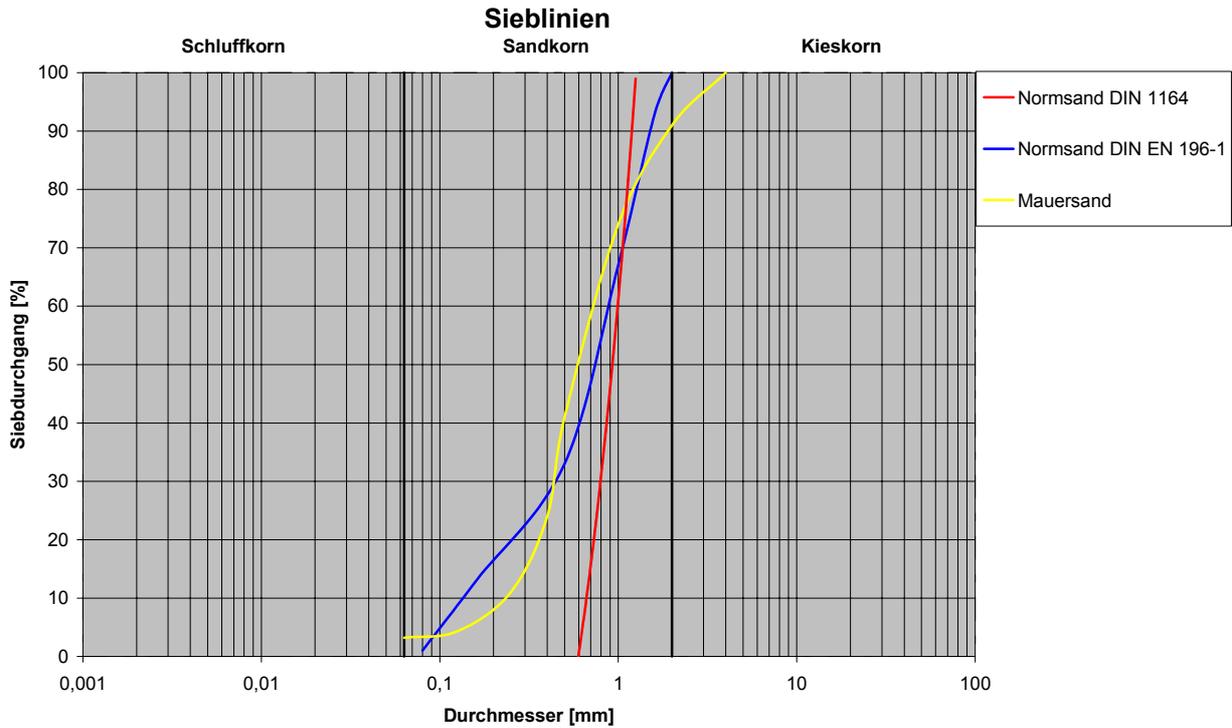


Abbildung 4-26: Sieblinien der Prüfsande

Während bei den reinen Bentonitsuspensionen die Abdichtwirkung in einem groben Porengefüge problematisch ist, muss bei den Bentonit-Zementsuspensionen die Eindringfähigkeit in feinkörnigen Boden gewährleistet sein. Die Abdichtwirkung wird durch die Hydratation des Zementes erreicht.

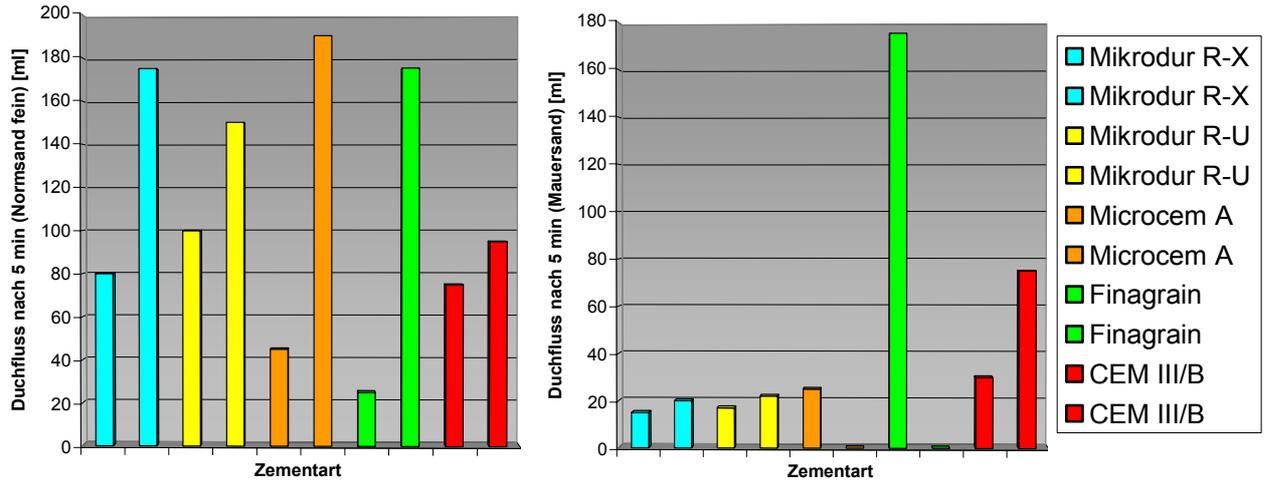


Abbildung 4-27: Durchflussmessung verschiedener Zementsorten in Normsand fein (links) und Mauer- sand (rechts)

Die Durchflussmessungen zum Einfluss der Zementsorte in Abbildung 4-27 zeigen, dass unter Vibrationseinfluss kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Mahlfeinheit des Zementes und der Penetrationseigenschaft nachgewiesen werden kann. Wie bei den reinen Bentonitsuspensionen sind die gemessenen Durchflüsse in dem grobkörnigeren Boden grundsätzlich wieder höher, jedoch weisen die Schwankungen innerhalb der 2 Versuche bei einer Zement- und Bodensorte auch auf eine geringe Reproduzierbarkeit der Messergebnisse hin. Während der Versuchsdurchführung wurde teilweise eine Kanalbildung durch die Bodenprobe festgestellt, die zu erheblichen Durchflussmengen außerhalb der eigentlich angestrebten Auffüllinjektion führte. Außerdem konnte ein Filtrationsprozess an der Prüfsandoberfläche beobachtet werden. Diese Oberflächenfiltration führt dazu, dass bei allen Prüfkörpern dieser Versuchsreihe in der anschließenden Dichtheitsprüfung keine Wasserverluste auftreten. Selbst bei den Prüfkörpern aus Mauer- sand, die nur sehr geringe bis gar keine Suspensionsdurchflussmengen aufwiesen, entsteht ein ausreichend abdichtender Injektionskörper.

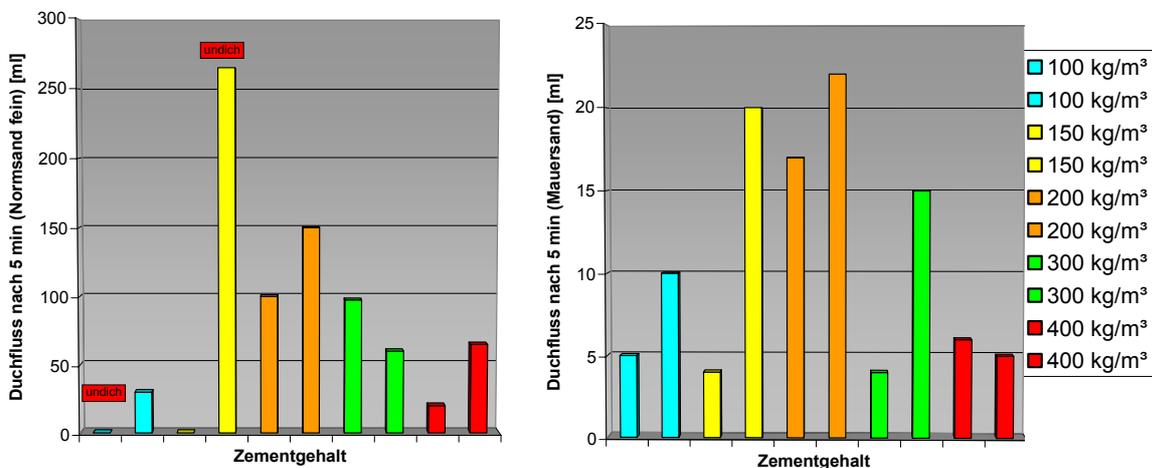


Abbildung 4-28: Durchflussmessung verschiedener Zementgehalte in Normsand fein (links) und Mauer- sand (rechts)

Bei den Zementgehalten ist ebenfalls keine eindeutige Abhängigkeit zwischen der Dosierung und der Eindringfähigkeit zu erkennen. Bis auf zwei Proben in feinem Normsand sind wieder alle Probekörper wasserundurchlässig. Die zwei undichten Proben weisen einmal keinen und einmal einen sehr hohen Suspensionsdurchfluss auf. Diese zunächst gegensätzlichen Voraussetzungen führen durch die Art der Injektion und den Grad der Porenraumfüllung in beiden Fällen zu inhomogenen Probekörpern. Dringt das Material nicht ausreichend tief in den Porenraum ein (kein Durchfluss messbar), ist die Abdichtwirkung der penetrierten Bodenschicht zu gering. Fließt das Material unkontrollierbar in Kanälen durch den Boden (sehr hohe Durchflüsse), wird der neben den Kanälen liegende Porenraum nicht durchströmt und somit nicht abgedichtet. Eine Abstimmung der Suspension auf die Bodenart ist demnach auch für Bentonit-Zementsuspensionen zwingend erforderlich. In den Ergebnissen für den feinkörnigen Mauer sand lässt sich die Tendenz erkennen, dass sich für diese Bodenart ein Dosierungsbereich von 150 kg/m^3 bis 300 kg/m^3 als optimal erweist.

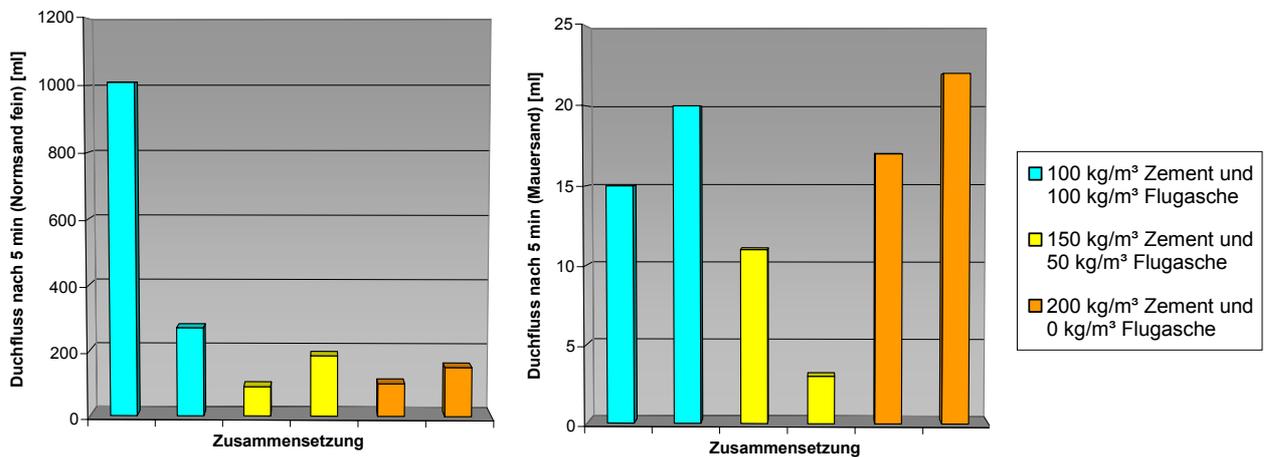


Abbildung 4-29: Durchflussmessung verschiedener Flugaschenanteile in Normsand fein (links) und Mauer sand (rechts)

Wie bereits bei den rheologischen Untersuchungen festgestellt wurde, zeigen die Durchflussversuche, dass die Substitution von Zement durch Flugasche auch im Hinblick auf die Injektionseigenschaften und die Abdichtung des Porenraums weder eindeutige Vor- noch Nachteile bietet (s. Abbildung 4-29). Daher wird der Zementersatz durch Flugasche aus rein wirtschaftlichen Erwägungen in den in situ nahen Versuchen weiter verfolgt.

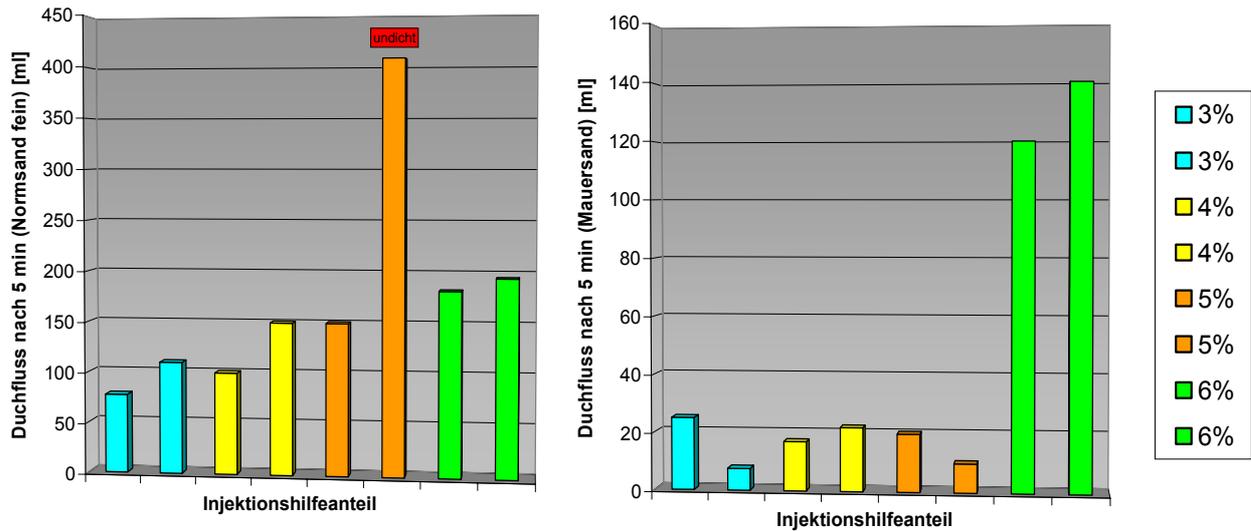


Abbildung 4-30: Durchflussmessung verschiedener Injektionshilfeanteile in Normsand fein (links) und Mauersand (rechts)

Aus Abbildung 4-30 geht hervor, dass die Auswirkungen des Injektionshilfeanteils wesentlich deutlicher ausfallen, als die bisher behandelten Einflussparameter. Mit steigendem Injektionshilfeanteil nimmt das dynamische Fließmoment ab und die verflüssigte Suspension dringt besser in den Boden ein. Die wasserdurchlässige Probe aus feinem Normsand mit einem Injektionshilfeanteil von 5 % weist wieder das Phänomen der Kanalbildung auf. Die vergleichsweise sehr hohen Durchflusswerte der Versuche mit einem Injektionshilfeanteil von 6 % im Mauersand wurden hingegen nicht durch eine ungewollte Kanalbildung hervorgerufen, sondern durch die extrem geringe Fließgrenze der Suspension. Die Bodenprobe wäre auch ohne die Einwirkung von Vibration durchdrungen worden, so dass im Sanierungsfall nach der Vibrationseinwirkung das Injektionsmaterial zu einem Großteil wieder in die Rohrleitung zurückfließen würde. Eine Überdosierung der Injektionshilfe ist daher kontraproduktiv, da sie zunächst zu einem unkontrollierbaren Abfluss der Suspension und nach dem Abpumpen der GEA infolge eines Rückflusses zu einer wasserdurchlässigen Ausbildung des Injektionskörpers führt.

4.2.2 Einfluss der Verfahrenstechnik

Zur Untersuchung des Materialeinflusses wurden die verfahrenstechnischen Parameter Injektionsdruck und Vibrationsstärke konstant gehalten. Der Injektionsdruck betrug durch den Versuchsaufbau 0,05 bar und war über die Füllstandshöhe im Standrohr unveränderlich. Der Einsatz des Druckluft-Kugelvibrators NCB 1 führte konstruktionsbedingt ebenfalls zu einer gleich bleibenden Vibrationsstärke. In einem zu den bisherigen Penetrationsuntersuchungen ähnlichen Versuchsaufbau wird der Einfluss von Injektionsdruck und Vibrationsintensität ermittelt (s. Abbildung 4-31).

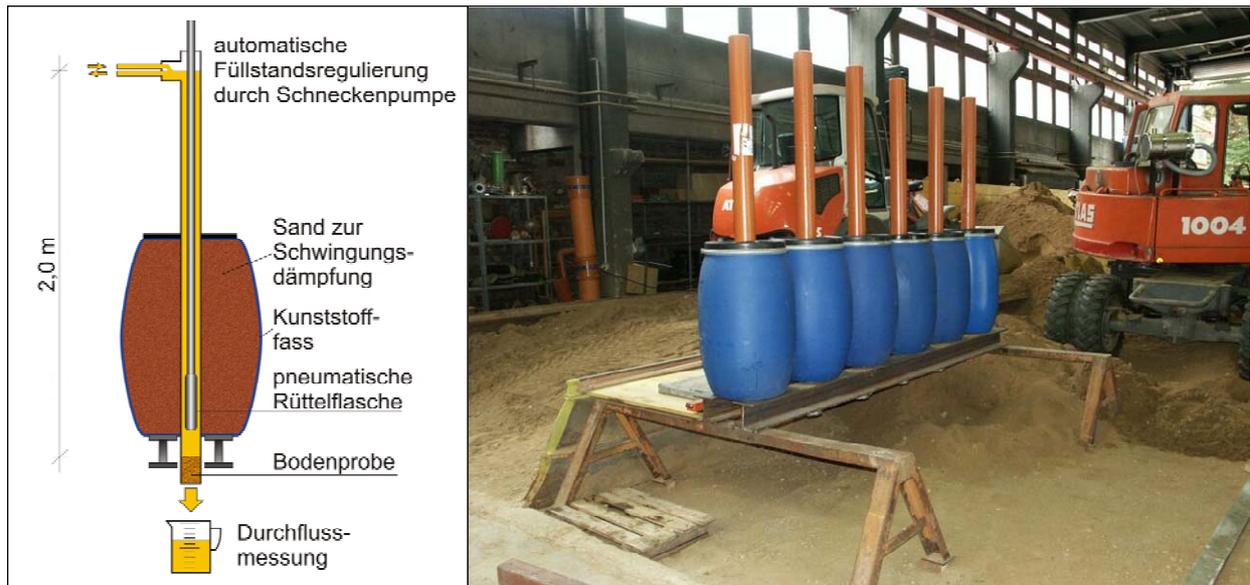


Abbildung 4-31: Durchflussversuche zum Einfluss verfahrenstechnischer Parameter

Die Erhöhung des Standrohres und der Einsatz der pneumatisch betriebenen Rüttelflasche ermöglichen die gezielte Variation der verfahrenstechnischen Randbedingungen. Die Vibrationserzeugung mit der pneumatischen Rüttelflasche ist in der Intensität durch den Betriebsdruck im Bereich von 2 bis 6 bar steuerbar. Durch die Einbettung der Standrohre in sandgefüllte Kunststofffässer wird die Vibration der Rohrwände gedämpft und so ein Schwingungsverhalten nachgebildet, das der späteren Sanierungspraxis erdverlegter Leitungen besser entspricht. Als Sanierungssuspension wird eine reine Bentonitsuspension mit einem Feststoffgehalt von 55 kg/m^3 Ibeco CT verwendet. Die Bodenprobe besteht aus feinem Normsand nach DIN EN 196-1. In einem Vorversuch wurde versucht, ohne die Einwirkung von Vibration nur durch Erhöhung der Suspensionssäule die reine Bentonitsuspension durch die Bodenprobe zu injizieren. Selbst nach 20 min Injektionsdauer und einer Injektionsdruckhöhe von 2 m konnte kein Durchfluss gemessen werden.

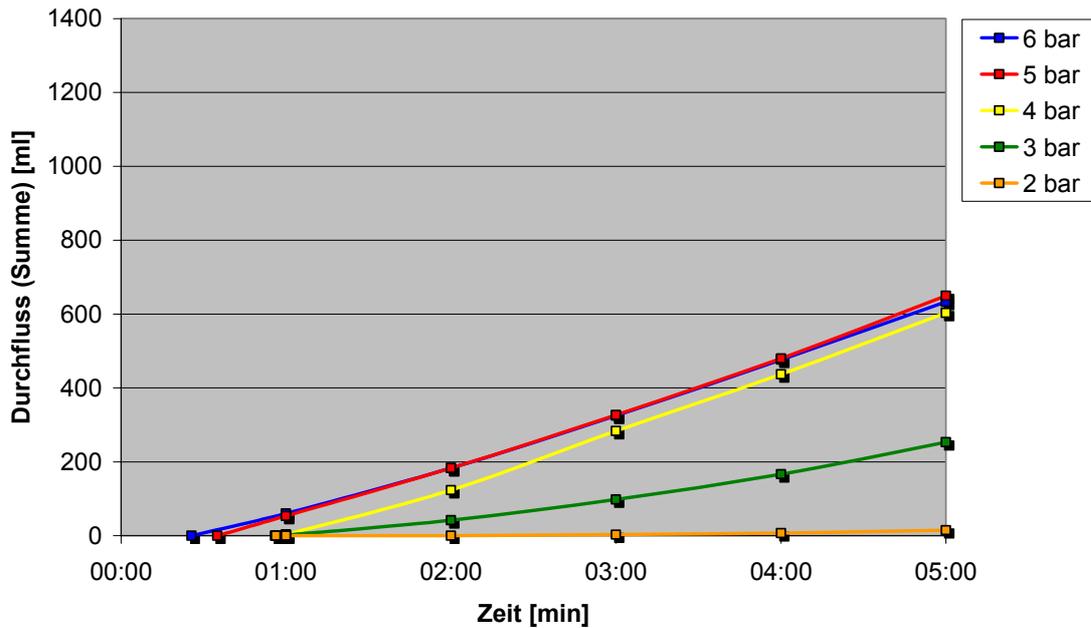


Abbildung 4-32: Durchflussmessergebnisse für verschiedene Vibrationsstärken bei einer Injektionsdruckhöhe von 1 m

In Abbildung 4-32 sind die Durchflussmessergebnisse für die Betriebsdrücke 2, 3, 4, 5 und 6 bar über einen Zeitraum von 5 min dargestellt. Während ein kontinuierlicher Durchfluss erst bei 3 bar Betriebsdruck erreicht wird, bewirkt eine Intensivierung der Vibration ab 4 bar keine wesentliche Erhöhung des Durchflusses. Offensichtlich kann bei 1 m Injektionsdruck ab einer gewissen Vibrationsintensität keine Verbesserung der Eindringfähigkeit erzeugt werden.

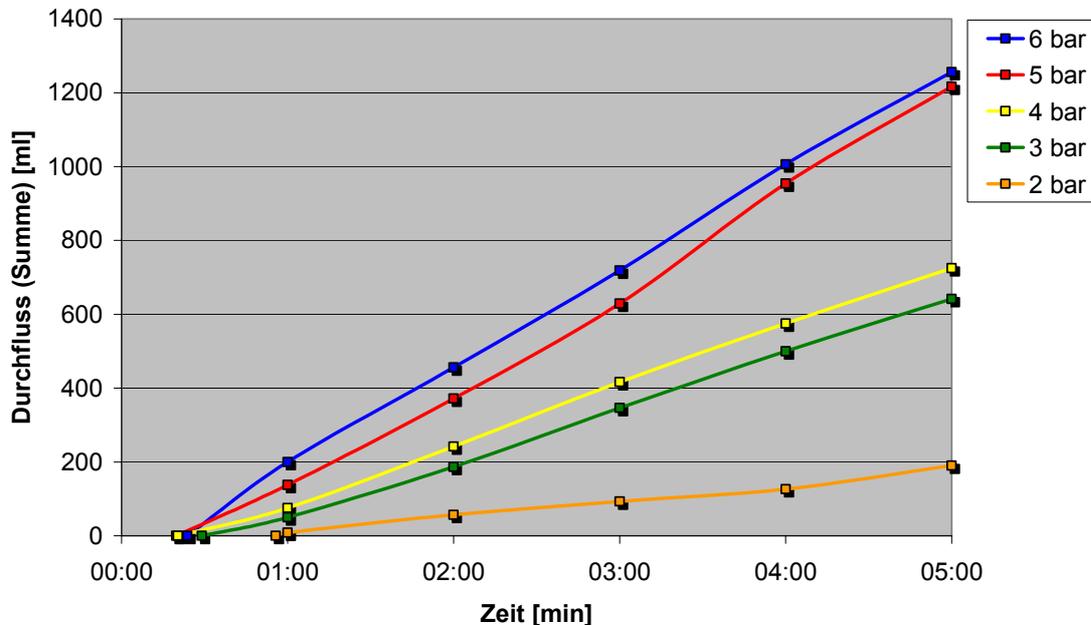


Abbildung 4-33: Durchflussmessergebnisse für verschiedene Vibrationsstärken bei einer Injektionsdruckhöhe von 2 m

Durch die Erhöhung des Injektionsdrucks auf 2 m, werden bereits ab 2 bar Betriebsdruck der Rüttelflasche konstante Durchflussraten gemessen. Eine weitere Steigerung der Vibra-

tionsstärke führt in Stufen von 3 und 4 bar sowie 5 und 6 bar zur erheblichen Verbesserung der Eindringfähigkeit. Der Vergleich der beiden Versuche zeigt, dass die untersuchten Parameter Injektionsdruck und Vibrationsstärke voneinander abhängig sind. Im niedrigen Vibrationsstärkebereich kann sich die Wirkung der Vibration erst bei einem ausreichenden Injektionsdruck voll entfalten. Bei hoher Vibrationsintensität führt eine Erhöhung des Injektionsdruckes von 1 m Suspensionssäule auf 2 m zu einer Verdoppelung der Durchflussmengen.

Bei der Sanierung in situ wird die Rüttelflasche mit einer gleichmäßigen Geschwindigkeit durch die Rohrleitung bewegt. Die maximale Vibrationsstärke wirkt auf eine Schadstelle nur für einen begrenzten Zeitraum ein. Mit wachsender Entfernung zwischen Rüttelflasche und Schadstelle nimmt auch die Vibrationsintensität ab. Um über einen möglichst langen Zeitraum eine vibrationsunterstützte Injektion zu gewährleisten, muss mit der höchsten Vibrationsstärke und einem Mindestinjektionsdruck von 2 m Suspensionssäule saniert werden.

Die Verfahrensalternative der Schwingungserzeugung durch eine pulsierende Suspensionssäule kann nicht sinnvoll in einem Durchflussmessversuch erprobt werden. Die Wirkungsweise ist nicht vergleichbar mit einer lokal einwirkenden Vibration und lässt sich daher nur direkt im Rahmen der praxisnahen Versuche an Rohrleitungssystemen untersuchen.

4.3 Dauerhaftigkeit der Injektionskörper

Für eine dauerhafte Wirksamkeit darf die sanierte Schadstelle nicht durch die Schleppspannungen des Abwassers ausgewaschen werden. Bei den reinen Bentonitsuspensionen ist eine Erosion durch direkten Kontakt des Injektionskörpers mit fließendem Abwasser nicht zu vermeiden. Da nur die Kontaktfläche der Erosion ausgesetzt ist, wird zur Abdichtung eine Tiefenwirkung des Injektionskörpers angestrebt. Die ausgewaschene Kontaktzone führt zu einer Verringerung der Fließgeschwindigkeit des Abwassers. Nicht fließende Abwässer wirken dann nicht erodierend, sondern führen eher zu einer Kolmation von Schwebstoffen in der Schadstelle. Dieser Wirkungsmechanismus wird in praxisnahen Erosionsversuchen nachgewiesen (s. Kapitel 5.2).

Bei den Bentonit-Zementsuspensionen wird durch die Hydratation des Zementes zwar in erster Linie eine abdichtende Wirkung verfolgt, zusätzlich führt die Festigkeit der Injektionskörper aber auch zu einer dauerhaften Erosionsstabilität der sanierten Schadstellen. In

der Literatur wird die Erosionsstabilität von Zementsuspensionen über eine Mindestdruckfestigkeit von $0,5 \text{ N/mm}^2$ definiert.¹⁷

Da die unregelmäßige und inhomogene Ausbildung der Sanierungskörper keine reproduzierbare Festigkeitsprüfung zulässt, wird die Druckfestigkeit an künstlichen Injektionskörpern bestimmt. Ein Herausschneiden regelmäßiger Prüfkörper wäre ebenfalls nicht zielführend, da aufgrund sehr geringer Festigkeiten eine Zerstörung der Probekörper oder zumindest eine starke undefinierte Beeinflussung zu erwarten wäre. Zur Herstellung der künstlichen Injektionskörper wird in Anlehnung an die Volumenverteilung im Boden ein Porenvolumen von ca. 30 % angenommen, das bei der Injektion mit Suspension gefüllt wird. Dementsprechend wird in einem Volumenverhältnis von 2 zu 1 ein Mörtel aus dem Prüfsand nach DIN EN 196-1 und unterschiedlichen Bentonit-Zementsuspension hergestellt und in einer Stahlschalung zu regelmäßigen Prüfkörpern mit den Abmessungen $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ vergossen. Nach einem Tag können die Prüfkörper ausgeschalt und bis zur Prüfung 7 bzw. 28 Tage in Wasser gelagert werden. Neben der absolut gemessenen Festigkeit soll eine Beeinflussung der Festigkeit infolge der Injektionshilfedosierung untersucht werden. Aus der Bindemittelindustrie ist bekannt, dass zu hohe Fließmittelzugabemengen zu einer Beeinträchtigung der Festigkeit führen können.

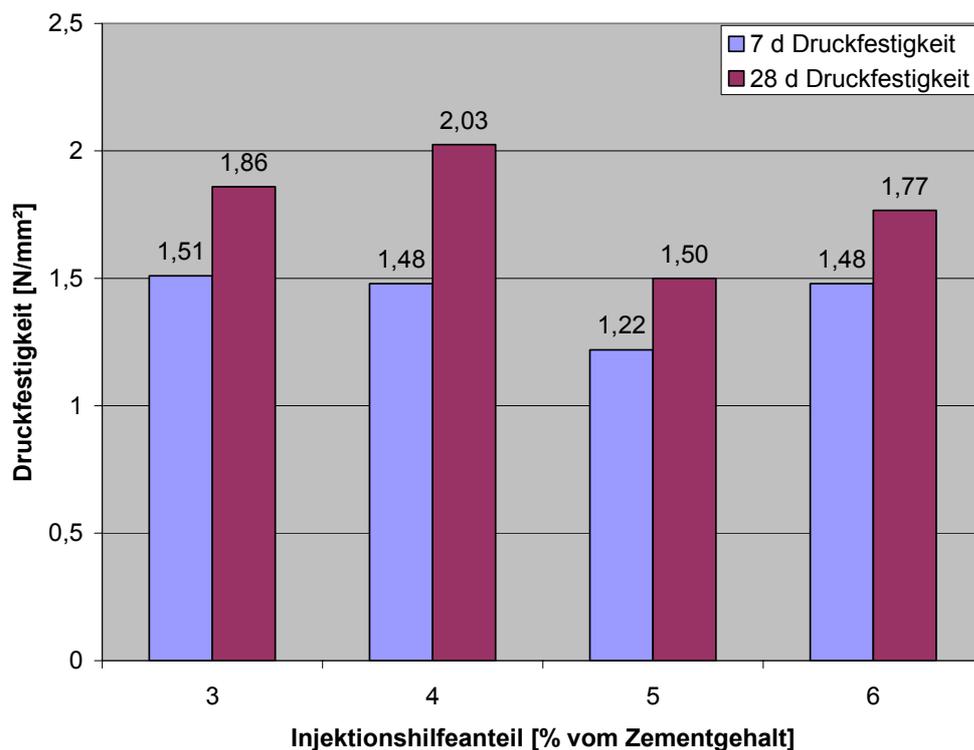


Abbildung 4-34: Druckfestigkeit der Injektionskörper

Die in Abbildung 4-34 dargestellten Festigkeitswerte stellen jeweils das arithmetische Mittel aus 6 Einzelprüfungen dar. Die für die Sanierung nötige Dosierungsbandbreite der Injektionshilfe von 3 bis 6 % hat offensichtlich keinen Einfluss auf die Druckfestigkeit. Die an

¹⁷ Vgl. Kutzner, C., Injektionen im Baugrund, 1991, S. 261.

den künstlichen Injektionskörpern ermittelten Festigkeiten sind jedoch nicht direkt auf reale Abdichtungskörper übertragbar. Durch Filtrationseffekte während der Injektion kommt es zu verschiedenen Festigkeitsbereichen innerhalb des Abdichtungskörpers. Die höchsten Festigkeiten entstehen durch den feststoffreicheren Suspensionsanteil direkt an der Schadstelle. Die in den Versuchen erzielten Werte spiegeln daher nur eine durchschnittliche Größenordnung wieder und sind ein erstes Anhaltsmaß für eine ausreichende Erosionsbeständigkeit. Eine abschließende Beurteilung der dauerhaften Erosionsbeständigkeit kann erst durch die praxisnahen Versuchsreihen gegeben werden.

5 In situ nahe Erprobung

Nachdem im Rahmen der Vorversuche die Einflüsse aus Materialzusammensetzung und ausgewählten verfahrenstechnischen Randbedingungen untersucht worden sind, können in den praxisnahen Erprobungen die Auswirkungen weiterer Randbedingungen genauer analysiert werden. Die in situ nahe Erprobung wird unterteilt in Basisversuchsreihen und Hauptversuche. In den Basisversuchsreihen werden Sanierungen an einzelnen Schadstellen unter gezielter Variation maßgebender Einflussgrößen simuliert und auf den Abdichtungserfolg hin untersucht. Bei den Hauptversuchen wird die Sanierung an einem Leitungsnetz durchgeführt, so dass sich die zuvor einzeln untersuchten Randbedingungen gegenseitig überlagern.

5.1 Einfluss ausgewählter Randbedingungen (Basisversuche)

Die Sanierungsbedingungen ergeben sich einzelfallabhängig aus dem Zustand eines Leitungsnetzes, der durch die Randbedingungen des Rohrleitungssystems definiert wird, sowie den Ausführungskriterien, die über die verfahrenstechnischen Parameter individuell festgelegt werden können. In der Versuchsreihe werden daher maßgebende Sanierungsbedingungen anhand von folgenden rohrleitungsspezifischen Einflussgrößen nachgebildet:

- Rohrmaterial
- Schadensart
- Rohrbettung

Zusätzlich wird der verfahrenstechnische Parameter der Schwingungserzeugung, wie bereits in Kapitel 4.2.2 erwähnt, aufgrund der höheren Praxisnähe der Basisversuche analysiert.

Die praxisnahe Untersuchung der Sanierungsqualität infolge ausgewählter Randbedingungen bedingt den Transfer realer Verhältnisse in ein Versuchskonzept. Für die Untersuchungen wird daher ein spezieller Versuchsaufbau erstellt und ein Versuchsprogramm festgelegt, welches wesentliche der in situ auftretenden Sanierungsbedingungen beinhaltet. Der Versuchsaufbau ist so konzipiert, dass die gezielte Herstellung der zu untersuchenden Sanierungsbedingungen sowie die realitätsnahe und einheitliche Ausführung der Sanierungen einfach möglich ist.

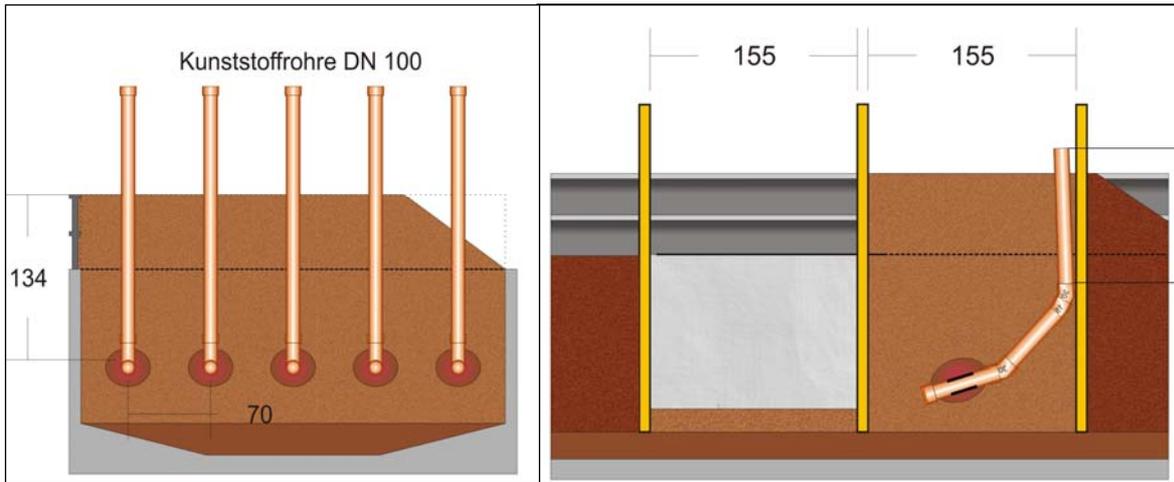


Abbildung 5-1: Versuchsaufbau der Basisversuchsreihen

Abbildung 5-1 zeigt den grundsätzlichen Aufbau der Basisversuchsreihen. Er setzt sich aus 5 L-förmig eingebauten Leitungssträngen zusammen, die im unteren, näherungsweise horizontalen Abschnitt mit einer Schadstelle versehen sind. Der Leitungszonenbereich wird mit Mauersand bei unterschiedlichem Verdichtungsgrad verfüllt. Die Sanierung wird sowohl mit reinen Bentonitsuspensionen als auch mit Bentonit-Zementsuspensionen durchgeführt, so dass für einen Einflussparameter 2 Versuche mit jeweils 5 gleichen Leitungssträngen durchgeführt werden. Experimentell können so verschiedene Sanierungsbedingungen geschaffen und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Dichtwirkung untersucht werden.

Die Versuchsdurchführung der Basisversuchsreihe setzt sich aus den nachfolgend beschriebenen Arbeitsschritten zusammen:

(1) Einbau der Rohrleitungsabschnitte und des Bodens

Die fünf Rohrleitungsabschnitte werden mit Feststelleinrichtungen und ausreichendem Abstand so in der Versuchsbahn fixiert, dass ein leichtes Gefälle des waagerechten Leitungsteils in Richtung des Leitungsendes besteht. Das Gefälle ist erforderlich, damit die Injektionsflüssigkeiten vollständig aus dem Leitungsabschnitt abgepumpt werden können. Anschließend wird der Mauersand lagenweise eingebaut und verdichtet (s. Abbildung 5-2).



Abbildung 5-2: Einbau der Rohrleitungsabschnitte

(2) Dichtheitsprüfung vor der Sanierung

Nach Herstellung der jeweils zu untersuchenden Randbedingung wird bei einigen Versuchen der Leitungsabschnitt einer vorlaufenden Dichtheitsprüfung unterzogen. Diese wird als Wasserdruckprüfung in Anlehnung an DIN 1986-30 mit einem Prüfdruck von 0,05 bar und einer Prüfzeit von 15 Minuten durchgeführt. Über den gemessenen Wasserverlust ist die Einschätzung des hergestellten Verdichtungsgrades möglich. Der Dichtheitsprüfung folgt eine 24-stündige Ruhephase, durch die der Abfluss des Prüfwassers aus den Poren gewährleistet ist.

(3) Injektionsvorgänge

Zunächst wird in den Rohrleitungsabschnitt die Rüttelflasche bis zur Schadstelle eingeführt. Über das offene Ende wird der Leitungsteil mit der Suspension befüllt, so dass sich ein Injektionsdruck von ca. 0,2 bar an der Schadstelle einstellt, der über ein Nachfüllen der Suspension hydrostatisch konstant gehalten wird. An eine fünfminütige Ruhephase vor der eigentlichen Injektion schließt sich eine zehnminütige Vibrationsphase an. Die Injektionsmittelverbräuche werden für beide Phasen protokolliert. Dem Injektionsvorgang folgt bei den zementhaltigen Suspensionen ein Erhärtungszeitraum von sieben Tagen.

(4) Dichtheitsprüfung nach der Sanierung

Nach der Erhärtungszeit wird der Abdichtungserfolg mittels einer Wasserdruckprüfung wieder nach Vorgabe der DIN 1986-30 mit einem Prüfdruck von 0,05 bar und einer Prüfzeit von 15 Minuten kontrolliert. Für den untersuchten Leitungsabschnitt ergibt sich aus

den Vorgaben der Norm ein zulässiger Wasserverlust von 63 ml für die DN 100 Kunststoffrohre und 94 ml für die DN 150 Steinzeugrohre.¹⁸

(5) Belastbarkeit des Abdichtungskörpers

Im Anschluss an die zuvor beschriebene Dichtheitsprüfung wird durch eine Wasserdruckprüfung mit einer Druckhöhe von 0,2 bar über einen Zeitraum von 30 Minuten die Belastbarkeit des Abdichtungskörpers kontrolliert. Die Grenzwerte der zulässigen Wasserverluste entsprechen denen der Wasserdichtheitsprüfung aus Arbeitsschritt (4). Wird die Belastungsprüfung nicht bestanden, erfolgt eine Wiederholung der Dichtheitsprüfung.

(6) Begutachtung der Abdichtungskörper

Die Versuchsdurchführung schließt mit dem Ausbau und der Begutachtung des Abdichtungskörpers hinsichtlich Abmessungen, Porenfüllung und Homogenität. Aus der Anschauung heraus wird klar, dass zur Abdichtung einer Schadstelle zwei notwendige Voraussetzungen erfüllt sein müssen. Zum einen ist dies die Wasserdichtheit des Abdichtungskörpers, zum anderen ist dazu die Dichtheit der Kontaktfläche zur Rohroberfläche erforderlich. Das beschriebene Wirkungsprinzip führt zu zwei möglichen Versagensursachen. Wasserverluste können demnach durch die Undichtigkeit innerhalb des Abdichtungskörpers und/oder die Undichtigkeit der Kontaktfläche „Abdichtungskörper-Rohrleitung“ entstehen (s. Abbildung 5-3).

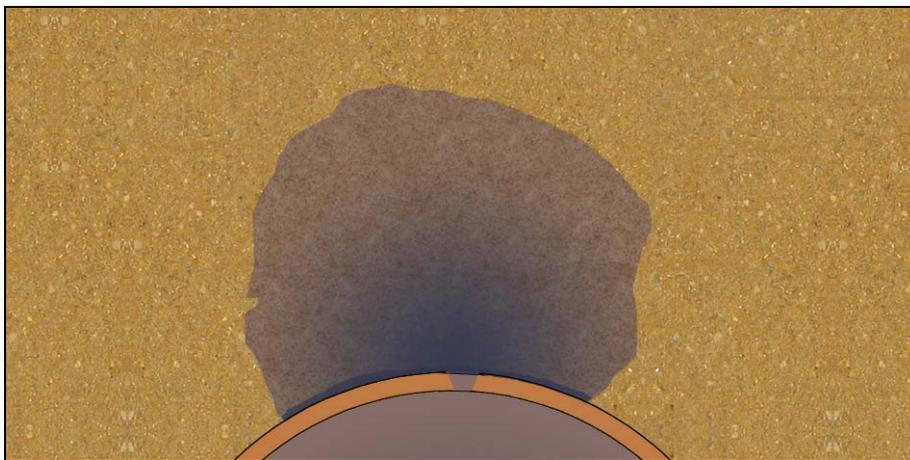


Abbildung 5-3: Versagensarten des Abdichtungskörpers

Die Abdichtungskörper sollten daher ein homogenes Boden-Suspensionsgefüge, ausreichende Abmessungen und ein gutes Haftvermögen an der Rohrleitungsoberfläche aufweisen.

¹⁸ Da es sich um eine einzelne Schadstelle pro Leitungsabschnitt handelt, wird zur Berechnung der zulässigen Wasserverluste eine Leitungslänge von einem Meter angesetzt.

5.1.1 Einflussgröße Rohrmaterial

Zur Untersuchung der Auswirkungen unterschiedlicher Rohrmaterialien werden Sanierungen mit Kunststoffleitungen (DN 100) und Steinzeugleitungen (DN 150) durchgeführt. Diese beiden Rohrmaterialien decken den Großteil der im Grundstücksentwässerungsbereich eingesetzten Werkstoffe ab. Als Schadstelle wird für beide Materialien eine undichte Muffe durch Entfernen der Gummidichtung simuliert (s. Abbildung 5-4). Der Mauersand wird mit einem mittleren Verdichtungsgrad¹⁹ eingebaut.

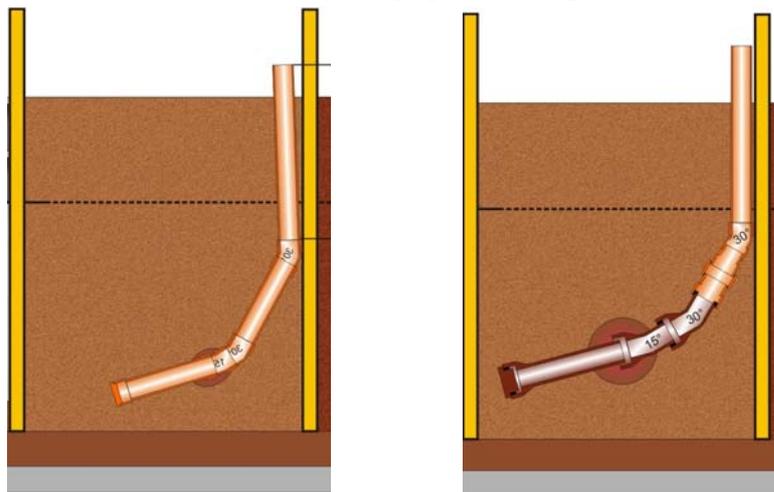


Abbildung 5-4: Versuchsaufbau: Einflussgröße Rohrmaterial (Kunststoff links, Steinzeug rechts)

Exemplarisch für alle weiteren Sanierungsergebnisse wird die Versuchsauswertung für die Sanierung einer Steinzeugmuffe mit einer reinen Bentonitsuspension (55 kg/m^3 Ibeco CT) im Folgenden ausführlich beschrieben.

Abbildung 5-5 zeigt die Materialverbräuche während der zehnmütigen Vibrationszeit getrennt für alle 5 Leitungen. Der Materialverbrauch in der fünfminütigen Ruhephase vor der Sanierung beträgt für alle Leitungen weniger als 50 ml.

¹⁹ Die Lagerungsdichte wird in Anlehnung an DIN 18126 in lockere, mitteldichte und dichte Lagerung eingestuft.

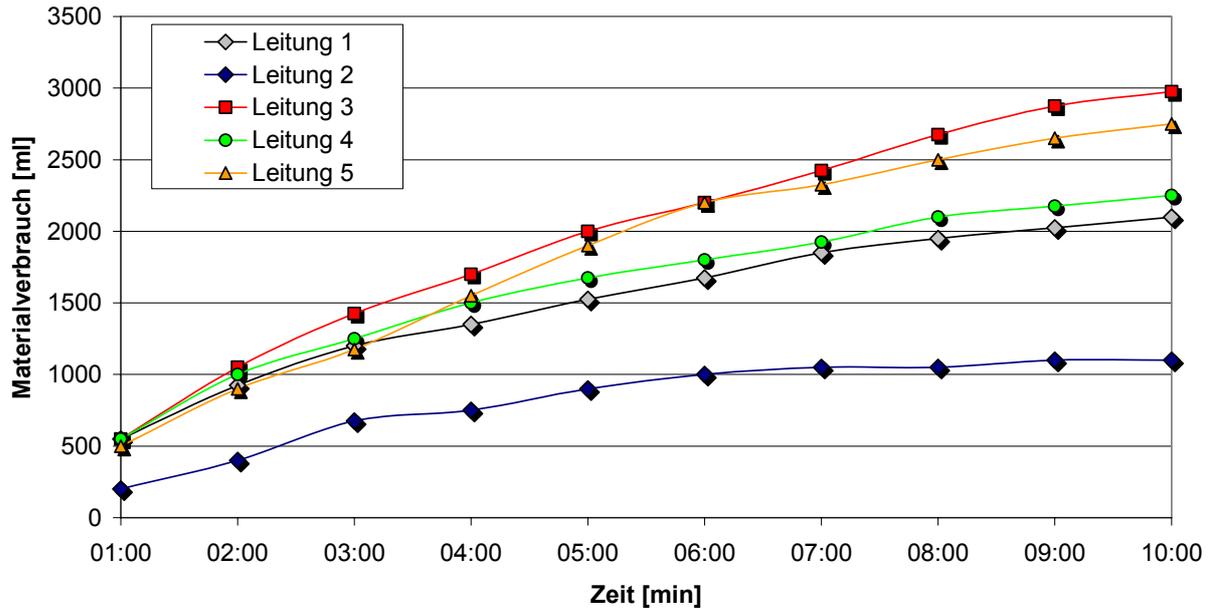


Abbildung 5-5: Materialverbrauch für die Sanierung einer Steinzeugmuffenverbindung mit einer reinen Bentonitsuspension

Der abflachende Kurvenverlauf bei allen Sanierungen deutet auf eine Porensättigung im Bereich der Vibrationsreichweite hin. Die absoluten Materialverbräuche sind alle von der gleichen Größenordnung und weisen bereits auf ausreichend große Abdichtungskörper hin. Bei einem mittleren Materialverbrauch von 2000 ml und einem durchschnittlichem Porenanteil von 33 % (mitteldichte Lagerung) ergibt sich das Volumen des Abdichtungskörpers zu ca. 6 Litern. Dies entspricht in etwa der Größe eines Fußballs.

Die Dichtheitsprüfung mit einer Druckhöhe von 0,5 m wird von allen Leitungen bestanden. Die Belastungsprüfung, deren Ergebnis in Abbildung 5-6 dargestellt ist, ergibt jedoch erhebliche Wasserverlustwerte. Auch bei der Wiederholung der Dichtheitsprüfung (0,5 m Wassersäule) können nur noch die Leitungen 2 und 4 das Dichtheitskriterium erfüllen. Die hohen Wasserverluste der Leitungen 1,3 und 5 während der Belastungsprüfung führen zu Auswaschungen im Porenraum des Injektionskörpers, so dass die Abdichtungswirkung herabgesetzt wird.

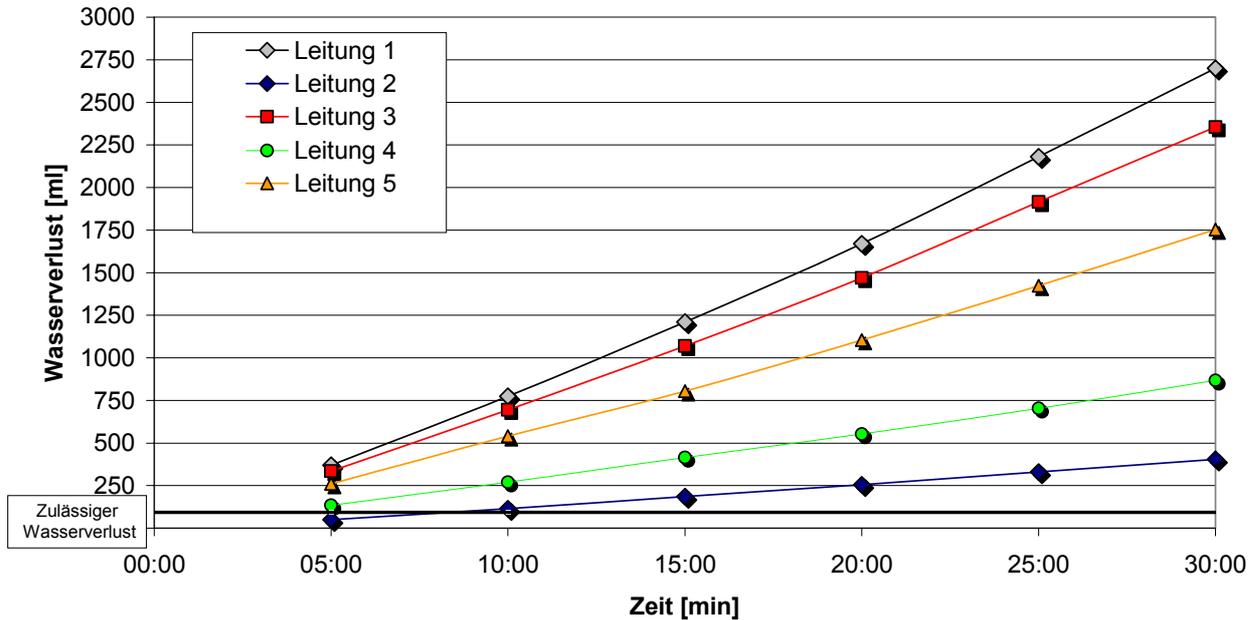


Abbildung 5-6: Wasserverluste während der Belastungsprüfung

Die Muffengeometrie von Steinzeugrohren weist nach Entfernen des Dichtungsringes einen ca. 5 mm breiten Ringspalt auf. Diese relativ große Angriffsfläche ist die Ursache für eine Überlastung während der 2 m Wasserdruckprüfung. Außerdem ist davon auszugehen, dass eine dauerhafte Abdichtwirkung infolge von Bentonitwaschungen während des normalen Leitungsbetriebes nicht gegeben ist. Auf der einen Seite führen großflächige Schadstellen zwar zu hohen Materialverbräuchen und somit zu ausgeprägten Abdichtungskörpern, auf der anderen Seite bieten sie jedoch bei reinen Bentonitsuspensionen auch zu große Angriffsflächen für negative Erosionserscheinungen.

Die Sanierung einer undichten Kunststoffrohrverbindung mit der reinen Bentonitsuspension ergibt große Unterschiede im Injektionsmittelverbrauch (s. Abbildung 5-7). Während in den Leitungen 2,3 und 4 nur sehr geringe Mengen injiziert werden können, sind die Materialverbräuche bei der Sanierung von Leitung 1 und 5 um ein Vielfaches höher. Dennoch ist bei allen Injektionen eine Sättigung zu erkennen. Die hohen Abweichungen im Mengenverbrauch sind auf unterschiedliche Verdichtungsgrade zurückzuführen, auch wenn beim Einbau eine gleichmäßige Verdichtung angestrebt wurde.

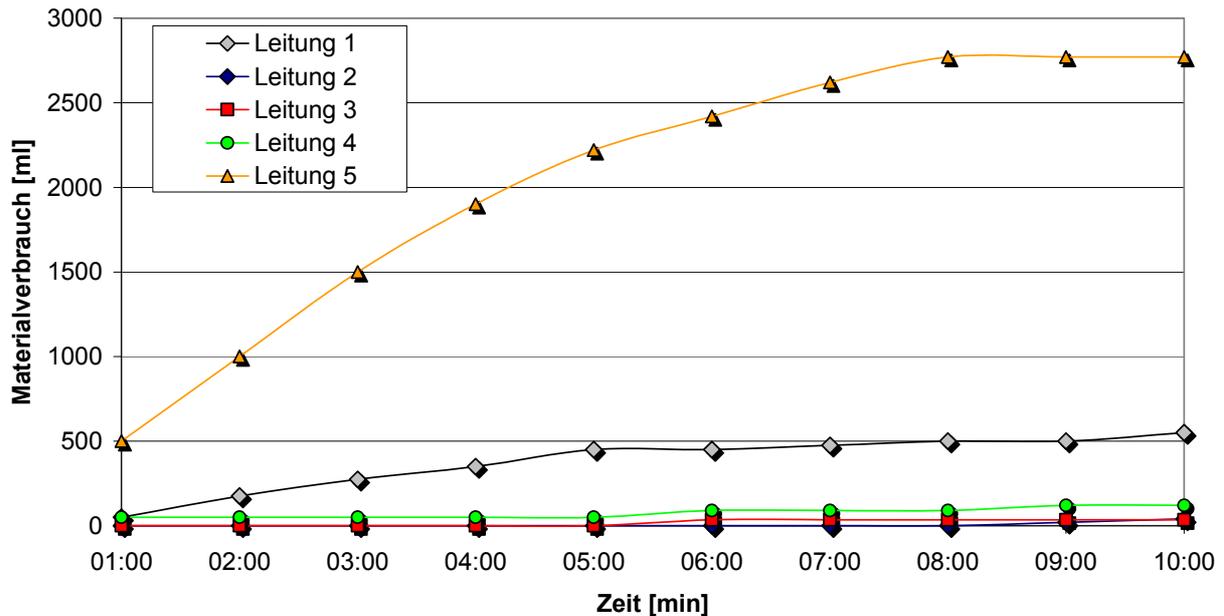


Abbildung 5-7: Materialverbrauch für die Sanierung einer Kunststoffmuffenverbindung mit einer reinen Bentonitsuspension

Für alle Leitungen kann eine Dichtheit bei 0,5 m Druckhöhe nachgewiesen werden. Die Belastungsprüfung wird ebenfalls von 4 Leitungen bestanden. Lediglich Leitung 1 weist einen konstanten Wasserverlust von 250 ml pro 5 min auf. Da bei der abschließenden Wiederholung der Dichtheitsprüfung wieder alle Leitungen dicht sind, hat die Belastungsprüfung auch bei Leitung 1 nicht zu einem Abdichtungsverlust infolge von Auswaschungen geführt. Nach der Freilegung der Schadstellen zeigt sich, dass die hohen Materialverluste von Leitung 5 auf eine einzelne Kanalbildung zurückzuführen sind. Bei den anderen Muffenverbindungen ist zumeist nur die Kunststoffmuffe selber mit der reinen Bentonitsuspension gefüllt. Abdichtungskörper, wie sie bei den Steinzeugmuffen entstehen, haben sich bei den Kunststoffmuffen nicht ausgebildet. Dies ist auf den wesentlich engeren Ringspalt der Kunststoffmuffe zurückzuführen. Auch wenn die Auswaschung hierdurch vermieden wird und trotz der geringen Materialverbräuche zunächst eine Dichtigkeit des Leitungsschnittes festgestellt werden kann, ist die Dichtwirkung wahrscheinlich zeitlich begrenzt.

Für reine Bentonitsuspensionen bleibt festzuhalten, dass sich kein ausreichend wirksamer Abdichtungskörper ausbildet, wenn zu geringe Suspensionsmengen injiziert werden. Die Suspension kann dann in von der Schadstelle entfernteren Bereichen nicht durch das enge Porengefüge des Bodens vor Auswaschungen geschützt werden.

Die Sanierung mit Bentonit-Zementsuspension folgt bei beiden Rohrmaterialien den gleichen Wirkungsmustern, die bereits bei reinen Bentonitsuspensionen festgestellt wurden. Die Suspension wird nach folgender Rezeptur angemischt:

- 20 kg/m³ Bentonit
- 150 kg/m³ Zement
- 50 kg/m³ Flugasche
- 4 % Injektionshilfe

Entsprechend der Muffengeometrie weisen die Sanierungen der Steinzeugrohre mit durchschnittlich 2500 ml im Vergleich zu den Kunststoffmuffenverbindungen mit nur durchschnittlich 150 ml wieder wesentlich höhere Materialverbräuche auf. Unabhängig von Geometrie und Material kann bei allen Leitungen sowohl die Dichtigkeit bei 0,5 m und 2 m Prüfdruck nachgewiesen werden. Offensichtlich reicht auch ein kleiner Injektionskörper für eine Abdichtung aus, da der Porenraum durch die Hydratation des Zementes geschlossen ist und auch größere erosionsgefährdete Flächen nicht ausgewaschen werden können. Dennoch sollte auch bei zementhaltigen Suspensionen im Sinne einer dauerhaften Wirksamkeit eine Mindestgröße des Abdichtungskörpers angestrebt werden. Abbildung 5-8 zeigt einen Abdichtungskörper, der bei der Sanierung einer Steinzeugmuffe entstanden ist. Der Injektionskörper ist von gleichmäßiger innerer Struktur und besitzt ein gutes Haftungsvermögen zu der glasierten Steinzeugoberfläche.



Abbildung 5-8: Injektionskörper bei einer Steinzeugmuffenverbindung

In den Versuchen zum Einfluss des Rohrmaterials können unabhängig vom Injektionsmaterial keine eindeutigen Vor- oder Nachteile des jeweiligen Rohrwerkstoffs festgestellt werden. Im Wesentlichen sind die Geometrie der Schadstelle und die Ausbildung von homogenen Abdichtungskörpern für eine erfolgreiche Sanierung verantwortlich. Aus den Sanierungsergebnissen ist zu schließen, dass bei gängigen Rohrmaterialien eine gute Sanierungsqualität gewährleistet ist.

5.1.2 Einflussgröße Schadensart

Die Untersuchungen zur Einflussgröße Schadensart werden mit den selben Rezepturen für die reinen Bentonitsuspensionen und die Bentonit-Zementsuspensionen durchgeführt, die bereits bei den Versuchen zur Auswirkung unterschiedlicher Rohrmaterialien eingesetzt wurden. Als Schadstellen werden in Kunststoffrohre DN 100 80 mm lange und 3 mm breite Schlitz in Rohrfirste und -sohle gefräst oder zur Simulation undichter Muffen die Muffendichtungen entfernt. Die Ergebnisse der Sanierung undichter Muffenverbindungen können für beide Suspensionsarten aus der vorherigen Basisversuchsreihe „Einflussgröße Rohrmaterial“ übernommen werden.

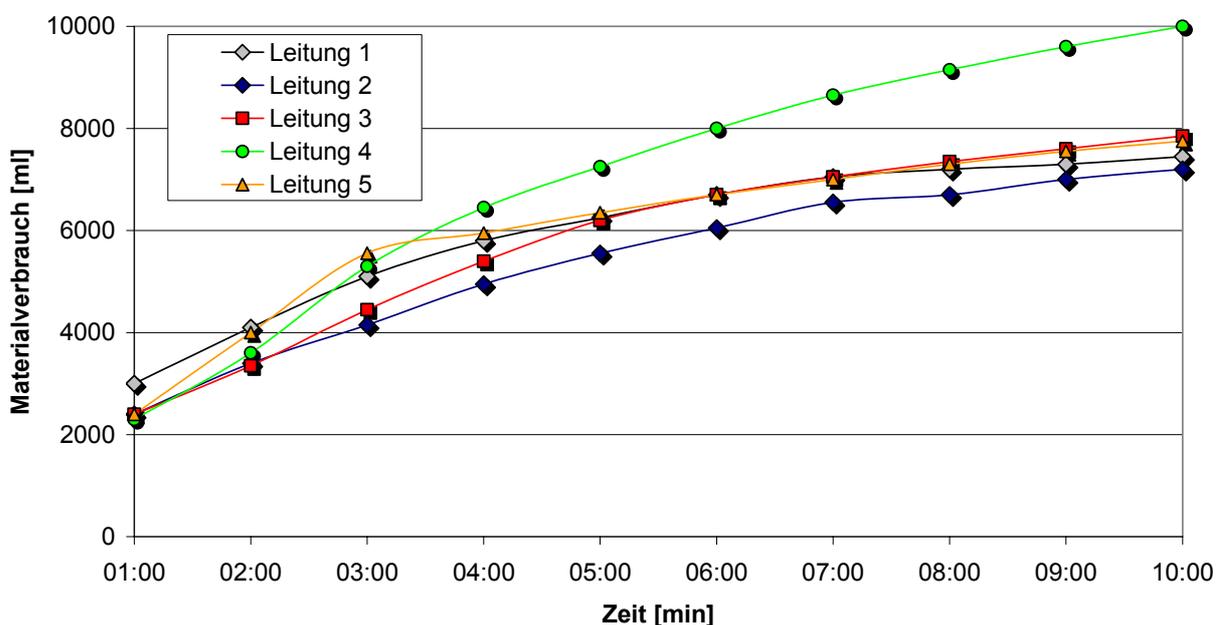


Abbildung 5-9: Materialverbrauch für die Sanierung einer Risschadstelle mit einer reinen Bentonitsuspension

Abbildung 5-9 zeigt die Materialmengenverbräuche bei der Sanierung von Risschadstellen mit einer reinen Bentonitsuspension. Für alle Sanierungen werden hohe Suspensionsmengen benötigt, deren Zuwachsrate über den Sanierungszeitraum abflacht. Trotz großer Abdichtungskörper und der Stagnation des Verbrauchs, die auf einen gefüllten Porenraum schließen lässt, kann keine der Leitungen das Dichtheitskriterium erfüllen. Beim Ausbau der sanierten Leitungen wird festgestellt, dass infolge der Vibration der Mauersand durch den Riss im Firstbereich in die Leitung gespült wurde. Auf diese Weise entsteht ein Hohlraum oberhalb der Rohrleitung, durch dessen Oberfläche die reine Bentonitsuspension in den Boden eindringt und einen voluminösen Abdichtungskörper bildet (s. Abbildung 5-10). Während der Dichtheitsprüfung kann vergleichsweise mehr Wasser über die Oberfläche des Hohlrums exfiltrieren, als dies durch den viel kleineren Riss im Kunststoffrohr möglich wäre.



Abbildung 5-10: Abdichtungskörper einer reinen Bentonitsuspension mit Hohlräum

Die Sanierung der First- und Sohlrisse mit Bentonit-Zementsuspensionen führt zu ähnlichen Ergebnissen wie die Sanierung mit reinen Bentonitsuspensionen. Die Materialverbräuche sind zwar geringer als bei den reinen Bentonitsuspensionen, jedoch gemessen an der Exfiltrationsfläche der Risse im Vergleich zu Muffenverbindungen immer noch wesentlich höher (s. Abbildung 5-11).

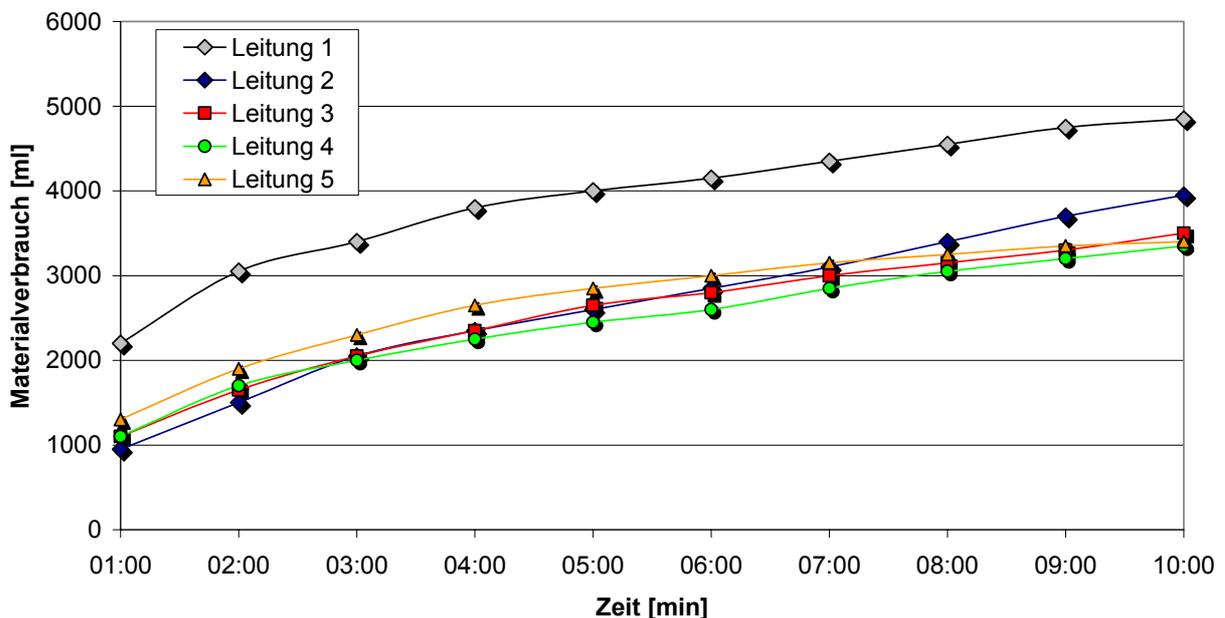


Abbildung 5-11: Materialverbrauch für die Sanierung einer Risssschadstelle mit einer Bentonit-Zementsuspension

Nach dem Ausbau zeigt sich wieder eine Hohlräumbildung oberhalb der Leitungen. Da in diesem Fall die Hohlräumoberfläche durch eine dünne Zementschicht bedeckt ist (s. Abbildung 5-12), erfüllen zumindest 2 von 5 Leitungen das Dichtheitskriterium. Die beiden dichten Leitungen können allerdings der Belastungsprüfung nicht standhalten und auch die Wiederholungsprüfung mit 0,5 m Drucksäule ergibt nur noch eine dichte Leitung.



Abbildung 5-12: Abdichtungskörper einer Bentonit-Zementsuspension mit Hohlraum

Im Vergleich zur Sanierung von Muffenverbindungen erweist sich die Sanierung von Rissen für beide Suspensionssorten als problematisch. Wenn schwerkraftbedingt eine Auspülung der Bettung im Firstbereich durch die Injektion vorliegt, sind die Sanierungsrandbedingungen besonders ungünstig. Die Längsrisse in der Sohle können hingegen sicher saniert werden. Möglicherweise führt jedoch eine Reduzierung der Rissbreite im Firstbereich zur geringeren Bodeninfiltration und zu homogenen Abdichtungskörpern ohne Hohlräume.

Aufgrund der Geometrie bildet sich hingegen bei Muffenverbindungen eine Schutzfunktion gegen Auswaschungen auch während der Sanierung aus, so dass bei dieser Schadensart alle Sanierungen bei entsprechender Suspensionsinjektion erfolgreich waren (s. Kapitel 5.1.1).

5.1.3 Einflussgröße Rohrbettung

Aus den Basisversuchen zu den Einflussgrößen Rohrmaterial und Schadensart wird deutlich, dass dem rohrumgebenden Boden eine hohe Bedeutung für den Sanierungserfolg zukommt. Der Verdichtungsgrad hat maßgeblichen Einfluss auf die injizierte Suspensionsmenge. Ein zu geringer Suspensionsverbrauch führt nur zu einem kurzzeitigen Abdichtungsergebnis. Bei einem zu hohen Verbrauch stellten sich Kanalbildungen ein, die inhomogene Abdichtungskörper verursachten. Durch die Anpassung der Fließfähigkeit an die jeweils vorliegende Durchlässigkeit des Bodens besteht jedoch die Möglichkeit, den Injektionsvorgang zu steuern und homogene Abdichtungskörper zu erzeugen.

In der Praxis gehen einer Sanierungsmaßnahme in fast allen Fällen eine Kamerabefahrung und eine Dichtheitsprüfung voraus. Unter der Voraussetzung, dass die Bettung einer

GEA annähernd gleichmäßig ist, können die Wasserverluste, die bei der Dichtheitsprüfung auftreten, auf die Einzelschadstellen verteilt werden. Aus der so gewonnenen Wasserverlustrate pro Schadstelle lässt sich eine Aussage über die Durchlässigkeit des Bodens und damit eine Prognose bezüglich des Suspensionsverbrauchs ableiten.

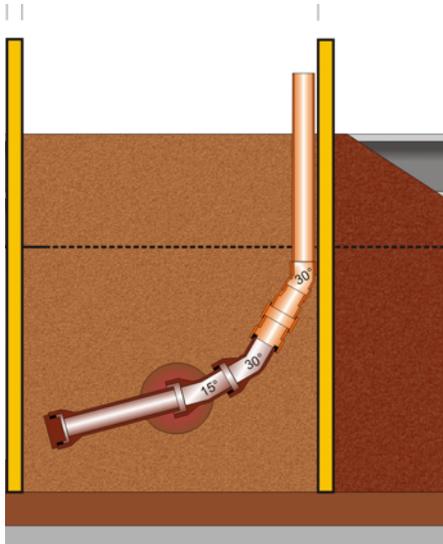


Abbildung 5-13: Versuchsaufbau zur Basisversuchsreihe Rohrbettung

Der theoretische Zusammenhang zwischen den Wasserverlusten einer vorlaufenden Dichtheitsprüfung und den Suspensionverbräuchen soll in den Basisversuchen zum Einfluss der Rohrbettung untersucht werden. Als Versuchsaufbau werden 6 mal 5 Leitungsstränge mit rheologisch unterschiedlichen Suspensionen saniert. Die Schadstellen bestehen aus einer undichten Steinzeugmuffenverbindung (s. Abbildung 5-13). Die Lagerungsdichte innerhalb eines Versuches soll möglichst gleichmäßig sein. Zur Bestimmung der tatsächlich erreichten Lagerungsdichte wird in einer der Sanierung vorangehenden Dichtheitsprüfung die Wasserverlustrate in Litern pro Minute bestimmt. Während der Sanierung, die wieder eine zehnmünütige Vibrationsphase beinhaltet, werden die Suspensionsverbräuche protokolliert.

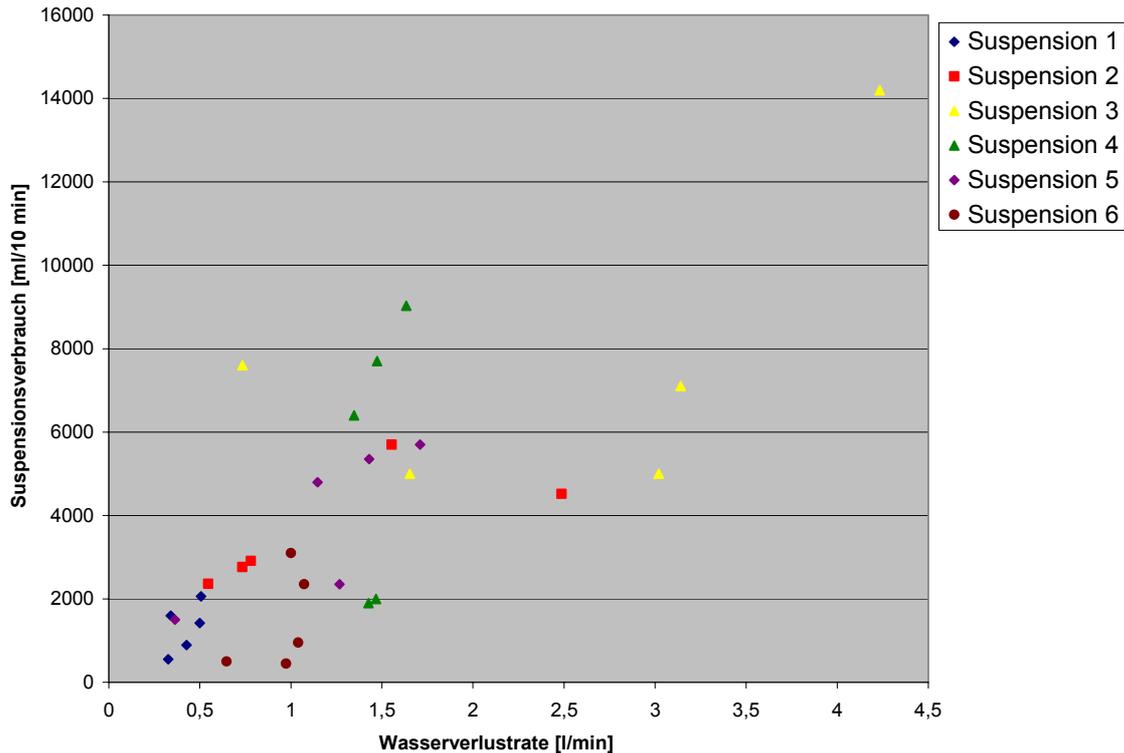


Abbildung 5-14: Zusammenhang zwischen Wasserverlustrate und Suspensionsverbrauch

Die Gegenüberstellung von Wasserverlustrate und Suspensionsverbrauch in Abbildung 5-14 zeigt, dass nur eine sehr begrenzte Aussage über den zu erwartenden Suspensionsverbrauch durch die Wasserverlustrate möglich ist. Tendenziell ist zwar der logische Zusammenhang gegeben, dass hohe Wasserverluste auch zu einer Erhöhung des Suspensionsverbrauchs führen, jedoch ist die Relation nicht quantitativ zu erfassen. Da selbst innerhalb eines Versuchs erhebliche Schwankungen auftreten, besteht für die praxisgerechte Anwendung nur die Möglichkeit, die Fließfähigkeit der Suspension entweder während der Sanierung anzupassen (z. B. über den w/f-Wert oder über Injektionshilfzugabe) oder durch Erfahrungswerte im Voraus eine geeignete Suspension zu wählen.

5.1.4 Einflussgröße Schwingungserzeugung

Die Verfahrenstechnik der injektionsunterstützten Schwingungseinwirkung soll an den in Kapitel 3.2 beschriebenen Methoden der schwingenden Suspensionssäule und der Vibration erprobt werden. Zur Bewertung der unterschiedlichen Schwingungssysteme wird in Sanierungsversuchen der Gesamtsuspensionseintrag als Vergleichsmaßstab bestimmt. Die Sanierung erfolgt an einer Steinzeugmuffenverbindung mit folgendem Versuchsaufbau:

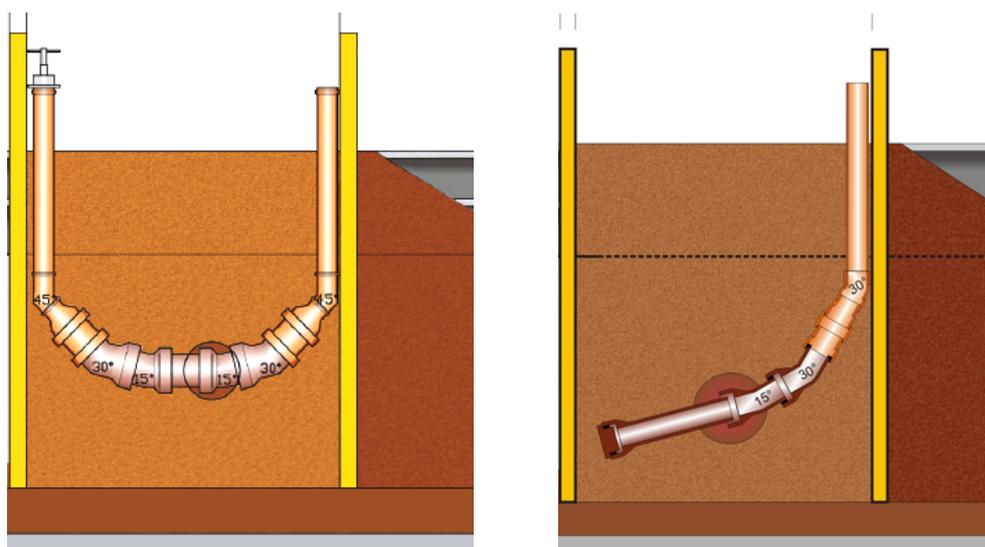


Abbildung 5-15: Versuchsaufbau zur Basisversuchsreihe Schwingungserzeugung
Schwingende Suspensionssäule (links), Vibration (rechts)

Zur Schwingung der gesamten Suspension wird eine pulsierende Volumenverdrängung an einem Ende des Leitungssystems erzeugt (s. Abbildung 5-15, links). Das andere Ende bleibt offen, um eine freie Schwingung zu ermöglichen, da andernfalls eine abwechselnde Druck- und Sogwirkung zu Auswaschungen im Boden und zu Hohlräumen führen würde. Die Frequenz der Schwingung wird während des Versuchs so an das Leitungssystem angepasst, dass eine gezielte Eigenfrequenzanregung (ca. 1 Hz) eine maximale Amplitude mit größtmöglichem Druckeintrag erzeugt. Die Sanierung mit lokalem Vibrationseintrag wird nach dem gleichen Versuchsablauf durchgeführt, der zur Ermittlung der Einflussgröße Rohrbettung Anwendung fand (s. Kapitel 5.1.3).

Ogleich die Basisversuche zur Einflussgröße Rohrbettung gezeigt haben, dass die Randbedingung Bodendurchlässigkeit unkalkulierbare Auswirkung auf den Materialverbrauch hat, weisen die Sanierungsergebnisse zwischen den Verfahrenstechniken zur Schwingungserzeugung signifikante Unterschiede auf. Während unabhängig von der Suspensionsart die Suspensionsmengenverluste beim Eintrag von Vibrationsschwingungen im Größenordnungsbereich von 1300 ml bis weit über 10000 ml liegen, sind bei einer pulsierenden Schwingung die Materialverbräuche im Bereich von 100 bis 500 ml mindestens um den Faktor 10 kleiner. Offensichtlich ist die Wirkung der schwingenden Suspensionssäule auf den leitungsinneren Bereich beschränkt, so dass die bereits exfiltrierte Suspension aufgrund eines dämpfenden Einflusses im Boden nicht zu weiteren Penetration angeregt wird. Die Vibration des Innenrüttlers regt dagegen neben der Suspension auch das Rohr und den umliegenden Boden zu Schwingung an und hat daher eine größere Wirkreichweite.

Bei einem angestrebten gleichmäßigen Bodeverdichtungsgrad kann daher trotz unerfassbarer Bettungsrandbedingungen festgestellt werden, dass die Methode der vibrationsoptimierten Injektion einen zuverlässigeren Suspensionseintrag gewährleistet.

5.2 Erosionsstabilität der Abdichtungskörper

Für eine dauerhafte Abdichtungswirksamkeit ist die Erosionsstabilität der Injektionskörper zwingende Voraussetzung. Während die reinen Bentonitsuspensionen ständig durch Erosion aus dem Abdichtungskörper ausgewaschen werden können, sind die Bentonit-Zementsuspensionen nur in den ersten Tagen auswaschungsgefährdet, da der Hydratationsprozess erst ab einer Festigkeit von ca. 0,5 N/mm² einen ausreichenden Schutz bietet. Um die Erosionsstabilität infolge einer direkten Inbetriebnahme kurz nach der Sanierung des Grundleitungsnetzes zu simulieren, wird die Abdichtungswirksamkeit des Injektionskörpers nach einer andauernden Wasserdurchflussbelastung erneut getestet. Hierzu werden erfolgreich sanierte Leitungen aus den Basisversuchen ausgewählt und im direkten Anschluss an die Sanierung mit Hilfe einer Umwälzpumpe einem 24 Stunden andauernden Freispiegelabfluss ausgesetzt. Anschließend werden die Leitungen wiederholt mit der 0,05 und 0,2 bar Druckprüfung getestet.

Als Ergebnis stellt sich heraus, dass die Geometrie der Schadstelle und die Größe des Abdichtungskörpers den größten Einfluss auf die Erosionsstabilität haben. Bei Muffenschäden konnten unabhängig von der Suspensionssorte keine Erosionserscheinungen festgestellt werden, da die Muffengeometrie eine Schutzwirkung für den Abdichtungskörper darstellt. Längsrisse, die in der Sohle der Leitung durch das fließende Wasser einer potenziellen Auswaschung ausgesetzt sind, ergeben in Abhängigkeit von der Größe des Abdichtungskörpers unterschiedliche Ergebnisse. Bei ausreichendem Suspensionseintrag und daraus resultierender Größe des Abdichtungskörpers sind die Leitungen auch nach der Durchflussbelastung noch dicht, da die Intensität der Schleppspannung bereits nach einer Distanz von wenigen Zentimetern zum eigentlichen Fließgerinne nicht mehr zu einer Erosion der Suspension ausreicht (s. Abbildung 5-16). Bei zu geringem Suspensionseintrag (kleiner 100 ml) wird der Injektionskörper bis zur Injektionsfront ausgewaschen und die Abdichtwirkung geht verloren.

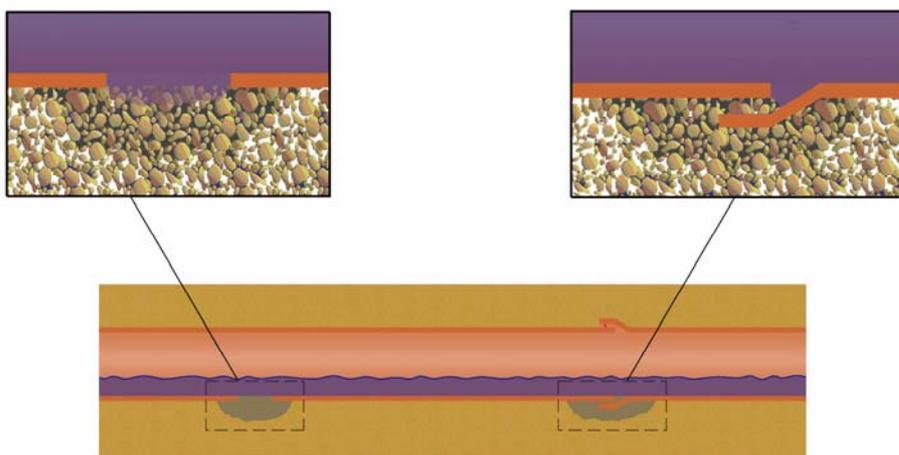


Abbildung 5-16: Einfluss der Schadstellengeometrie auf die Erosionsstabilität

5.3 Erprobung der Verfahrenstechnik an in situ nahen Leitungsnetzen

Zur Erprobung des gesamten Sanierungsverfahrens wird ein Grundleitungsnetz realitätsnah nachgestellt und mit der vibrationsoptimierten Injektion sowohl mit einer reinen Bentonitsuspension (Hauptversuch I), als auch mit einer Bentonit-Zementsuspension (Hauptversuch II) saniert.

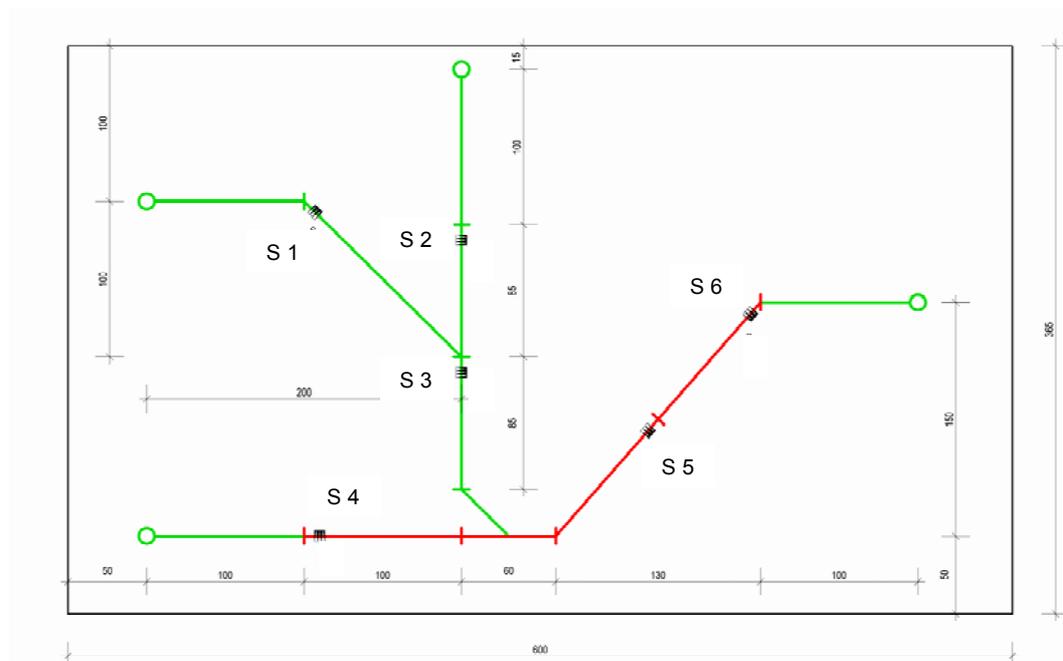


Abbildung 5-17: Versuchsaufbau Grundleitungsnetz

Das ca. 17 m lange Grundleitungsnetz besteht aus Kunststoffrohren DN 100 (s. Abbildung 5-17, grün) und aus Steinzeugrohren DN 150 (s. Abbildung 5-17, rot). Die Leitungen enthalten insgesamt 6 Schadensstellen in Form von radialen und axialen Rissen sowie undichte Muffen (s. Tabelle 5-1). Die gewählten Schadensbilder bewegen sich innerhalb der durch die Basisversuche festgestellten Anwendungsgrenzen.

Tabelle 5-1: Schadensstellen im Hauptversuch

Nr.	Rohrmaterial	Art	Richtung	Länge [mm]	Breite [mm]
1	Kunststoff	Radialriss	Einseitig im Kämpfer	1 x 80	3
2	Kunststoff	Axialriss	Beidseitig im Kämpfer	2 x 80	3
3	Kunststoff	Muffe	radial	Dichtring entfernt	
4	Steinzeug	Muffe	radial	Dichtring entfernt	
5	Steinzeug	Radialriss	Einseitig im Kämpfer	1 x 80	2
6	Steinzeug	Axialriss	Einseitig im Kämpfer	1 x 80	2

Das Rohrleitungsnetz wird mit einem mittleren Verdichtungsgrad in den bereits bei den Basisversuchen erprobten Muersand eingebettet.



Abbildung 5-18: Eingebautes Grundleitungsnetz aus Kunststoff- und Steinzeugrohren

Vor der Sanierung wird eine Dichtheitsprüfung an dem gesamten Leitungsnetz simuliert und die Wasserverlustrate gleichmäßig auf die 6 Schadstellen verteilt. Prinzipiell hätte die Wasserverlustrate auch für jede Schadstelle einzeln bestimmt werden können, jedoch entspricht eine gleichmäßige Verteilung der Wasserverluste den Anwendungsmöglichkeiten, die in der Realität umsetzbar sind.

Nach einer Ruhephase von mindestens 24 Stunden wird das Leitungsnetz mit der Sanierungssuspension bis zur Oberkante der Rohrleitung befüllt. Der Injektionsdruck beträgt dann ca. 0,15 bar an jeder Schadstelle. Da in der Praxis die genaue Lage der Schadstelle meistens nicht bekannt ist, muss die Vibration auf jede Stelle des Leitungsnetzes einwirken. Deshalb wird der Innenrüttler mit einer Geschwindigkeit von ca. 0,4 m/min durch die Leitung gezogen. Die Reichweite der Vibration sorgt selbst bei einem Vorbeiziehen des Innenrüttlers für eine ausreichende Einwirkungsdauer an der Schadstelle. Die bei der Sanierung aufgetretenen Suspensionsverluste werden wieder protokolliert und ebenfalls gleichmäßig auf die Schadstellen verteilt. Die Ergebniskontrolle erfolgt zunächst für jede Schadstelle einzeln und dann für das gesamte Netz. Zusätzlich zu einer Belastungsprüfung mittels erhöhter Wasserdrucksäule werden die Leitungen einer Hochdruckreinigung mit ca. 180 bar Düsendruck unterzogen und im Anschluss nochmals auf ihre Dichtheit mit 0,05 bar und 0,2 bar Wasserdruck getestet. Zum Abschluss des Versuchs werden die Abdichtungskörper freigelegt und nach Form und Homogenität begutachtet.

5.3.1 Sanierung mit reiner Bentonitsuspension (Hauptversuch I)

Die vorlaufende Dichtheitsprüfung lässt mit einem mittleren Wasserverlust von 1,5 Litern pro Minute und Schadstelle auf eine mitteldichte Lagerung des Bodens schließen, so dass aus den Erfahrungen der Basisversuche mit einer Suspension mit einem Bentonitgehalt von 55 kg/m^3 gute Injektionsergebnisse zu erwarten sind. Der mittlere Materialverbrauch liegt jedoch mit 600 ml pro Schadstelle unterhalb der gewünschten Eintragsmenge. Daher kann bei nicht gleichmäßiger Verteilung von keiner ausreichenden Größe der einzelnen Abdichtungskörper ausgegangen werden. Bis auf Schadstelle Nr. 5 liegen bei allen übrigen Schadstellen die Wasserverluste bei einem Prüfdruck von 0,05 bar zwar noch unterhalb des zulässigen Grenzwertes. Die Belastungsprüfung mit 0,2 bar wird jedoch nur noch von den Schadstellen 1 bis 4 bestanden. Nach dem Einsatz der Hochdruckspülung können die Schadstellen 4 und 6 das Dichtheitskriterium bei 0,05 bar Prüfdruck noch erfüllen. Bei 0,2 bar ist nur noch Schadstelle 4 dicht.

Die einzige dauerhaft dichte Schadstelle Nr. 4 ist eine Muffenschadstelle in einer Steinzeugrohrleitung. Nach den Untersuchungen durch die Basisversuche bietet sie damit die besten Voraussetzungen für eine erfolgreiche Sanierung.

Durch die Freilegung aller Schadstellen bestätigt sich die bei dem geringen Suspensions-eintrag vermutete unzureichende Größe der Abdichtungskörper. Außerdem ist die Injektionsfront beim Ausbau des Leitungsnetzes nicht mehr hinreichend genau definiert, da die reine Bentonitsuspension keine Festigkeit ausbildet und durch die Wasserdruckprüfung und Hochdruckreinigung die Abdichtungskörper stark ausgewaschen werden.

Die Sanierungsmaßnahme hat zwar zu einer weitgehenden Verringerung der Undichtigkeit gemessen an der Wasserverlustrate geführt (vor Sanierung 1500 ml/min, nach Sanierung 15 ml/min), jedoch konnte die dauerhafte Dichtigkeit des gesamten Netzes nicht erreicht werden. Die Reinigung mit Hochdruckspülung schädigt den Abdichtungskörper zu sehr, so dass von dieser Reinigungsmethode nach einer Sanierung mit reinen Bentonitsuspension abgeraten werden muss.

5.3.2 Sanierung mit Bentonit-Zementsuspension (Hauptversuch II)

Bei der vorlaufenden Dichtheitsprüfung wird mit 1,7 Litern pro Minute und Schadstelle eine ähnliche Verdichtung wie im ersten Hauptversuch festgestellt. Die Bentonit-Zementsuspension wird nach folgender Rezeptur auf den Verdichtungsgrad des Mauer-sandes abgestimmt:

- 20 kg/m³ Bentonit
- 150 kg/m³ Zement
- 50 kg/m³ Flugasche
- 4 % Injektionshilfe

Die Suspension kann mit Erfolg und in ausreichender Menge injiziert werden. Der durchschnittliche Suspensionsverbrauch beträgt 7000 ml. Während der Vibrationsphase wird außerdem ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Position des Innenrüttlers und dem Suspensionsverbrauch festgestellt. Ein Nachfüllen der Suspension ist immer dann erforderlich, wenn sich die Vibrationsflasche in der Nähe einer Schadstelle befindet²⁰. Die Dichtheits- und Belastungsprüfungen werden von allen Schadstellen bestanden. Die Hochdruckspülung, die 7 Tage nach der Sanierung durchgeführt wird, hat ebenfalls keine negativen Auswirkungen auf die Abdichtungskörper.

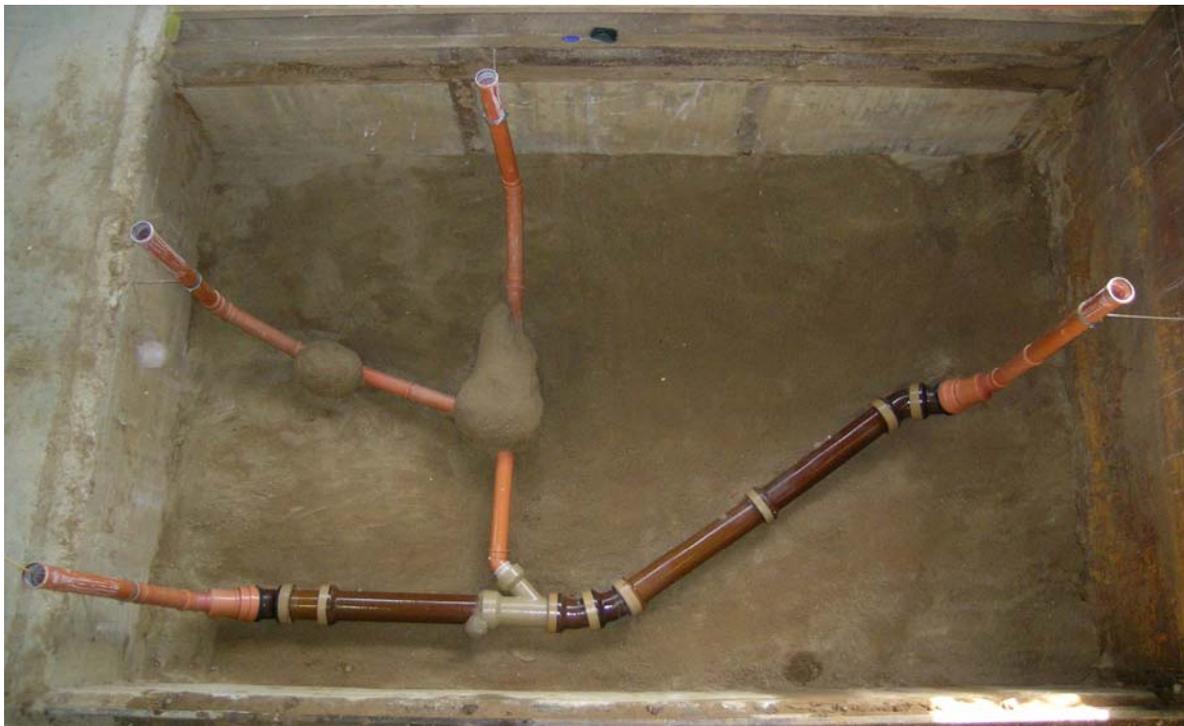


Abbildung 5-19: Saniertes Grundleitungsnetz mit Abdichtungskörpern

²⁰ Über die Länge des Zuleitungsschlauches der Vibrationsflasche konnte die ungefähre Lage innerhalb des Leitungsnetzes bestimmt werden.

Abbildung 5-19 zeigt das freigelegte Leitungsnetz mit den Injektionskörpern. Die erheblichen Unterschiede in der Größe der Abdichtungskörper sind auf eine ungleichmäßige Verdichtung und verschiedene Schadstellengrößen (s. Tabelle 5-1) zurückzuführen. Die größeren Abdichtungskörper haben sich in Folge der Vibrationsreichweite radial um die Leitung ausgebildet. Durch Aufsägen der zusammengewachsenen Abdichtungskörper um die Schadstellen 2 und 3 kann eine homogene, feste Boden-Zementsteinstruktur ohne Hohlraum- oder Aderbildung nachgewiesen werden (s. Abbildung 5-20).



Abbildung 5-20: Abdichtungskörper um die Schadstellen 2 und 3

Die Struktur des Abdichtungskörpers der Schadstelle 1 weist hingegen eine Hohlräumbildung oberhalb der Kunststoffleitung auf (s. Abbildung 5-21). Eine bis zu 4 mm starke Zementsteinschicht, die sich während der Injektion als Oberflächenfiltrat abgesetzt hat, führt dennoch zu positiven Dichtheitsergebnissen. Die Bildung des Hohlraums ist auf eine Auswaschung des im Firstbereich anstehenden Sandes durch den Radialriss zurückzuführen. Da sich die 3 mm breite Schadstelle radial um die Leitung bis in den Firstbereich erstreckte, ist die Ursache des unerwünschten Hohlraums die gleiche, die in den Basisversuchen bei den im Rohrscheitel befindlichen Rissen nachgewiesen wurde (s. Kapitel 5.1.2).



Abbildung 5-21: Abdichtungskörper um die Schadstelle 1

6 Zusammenfassung und Ausblick

Nachdem in den letzten Jahren die Sanierung öffentlicher Kanalisationen mit großem Erfolg betrieben wurde, werden in Zukunft im Sinne eines ganzheitlichen Sanierungsansatzes die privaten Grundstücksentwässerungsanlagen den Sanierungssektor vor neue Herausforderungen stellen. Einen Beitrag zur kostengünstigen und umweltschonenden Sanierung der privaten Leitungen leistet die Erforschung neuartiger Sanierungsmethoden. In Anlehnung an die Verfahrenstechnik des Wasserglas - Flutungsverfahrens sollte in diesem Forschungsprojekt die Entwicklung und Erprobung mineralischer Injektionssuspensionen zur Sanierung von Grundleitungsnetzen untersucht werden.

Das neuartige Verfahren nutzt das bestehende Leitungssystem als Förder- und Verteilungen sowie zum Aufbau des Injektionsdruckes, so dass selbst bei eingeschränkter Zugänglichkeit und ohne eine genaue Schadstellenlokalisierung eine Sanierung in einem Arbeitsgang möglich ist. Durch die vibrationsoptimierte Injektionstechnik dringt die Suspension in das Erdreich ein und verbleibt nach dem Abpumpen der Restsuspension als abdichtender, außen liegender Boden-Suspensionskörper im Leitungszonenbereich. Die Sanierungsmaßnahme kann daher nur unter Einbeziehung des rohrumgebenden Bodens in den Verfahrensprozess von dauerhafter Wirksamkeit sein. Eine der Sanierung vorangehende Wasserdruckprüfung dient als Anhaltswert für die Durchlässigkeit des Bodens hinter der Schadstelle. Die Fließfähigkeit der Sanierungssuspension muss dann auf die anstehende Bodenbettung angepasst werden.

In praxisnahen Versuchen wurden verschiedene Randbedingungen systematisch untersucht und der Anwendungsbereich des Sanierungsverfahrens abgegrenzt. Die Sanierungsergebnisse zeigen die grundsätzliche Eignung des Verfahrens. Mit Bentonit-Zementsuspensionen können unabhängig vom Rohrmaterial Muffenschäden und Risse bis zu einer Größe von 3 mm sicher abgedichtet werden. Die Sanierung mit reinen Bentonitsuspensionen führt nicht immer zur Einhaltung der normativen Dichtheitsprüfkriterien. Dennoch kann die Durchlässigkeit der Schadstelle durch die Sanierung um etwa den Faktor 100 verringert werden. Unwägbarkeiten im Zusammenhang Bodendurchlässigkeit – Suspensionsverbrauch sowie Hohlraum- und Aderbildung sind jedoch noch eingehender zu untersuchen.

Die intensive Analyse der Materialeinflussparameter auf die Injektionsfähigkeit der Sanierungssuspension ermöglicht eine optimale Anpassung der Fließeigenschaften auf die jeweils unterschiedlichen Randbedingungen verschiedener Grundleitungsnetze. Für die Praxiserprobung wäre eine Weiterentwicklung der Vibrationseinheit erforderlich, um eine sichere und vollständige Befahrung der verzweigten GEA zu gewährleisten. Eine Optimierung des Sanierungsverfahrens im Hinblick auf Verfahrens- und Gerätetechnik kann zielgerichtet jedoch nur durch die Sanierung bestehender Grundleitungen in situ erfolgen. Die

über Jahre entstandene Bettungssituation realer GEA lässt sich letztlich in simulierten Teststrecken nicht hinreichend genug nachbilden. Einer abschließenden Beurteilung des neu entwickelten Sanierungsverfahrens muss dementsprechend der Transfer der bisherigen Ergebnisse in einer in-situ-Erprobung vorausgehen.

Zur Überprüfung der Wirtschaftlichkeit wird im Folgenden ein Vergleich zwischen dem Wasserglas - Flutungsverfahren und dem neu entwickelten mineralischen Sanierungsverfahren vorgenommen. Bei einem gewöhnlichen Grundleitungsnetz mit 35 m Länge aus DN 100 und DN 150 Leitungen beträgt das Leitungsvolumen etwa 450 Liter. Die durchschnittlichen Kosten setzen sich bei der Sanierung mit dem Wasserglas- Flutungsverfahren nach der Kostenaufteilung in Abbildung 6-1 zusammen.

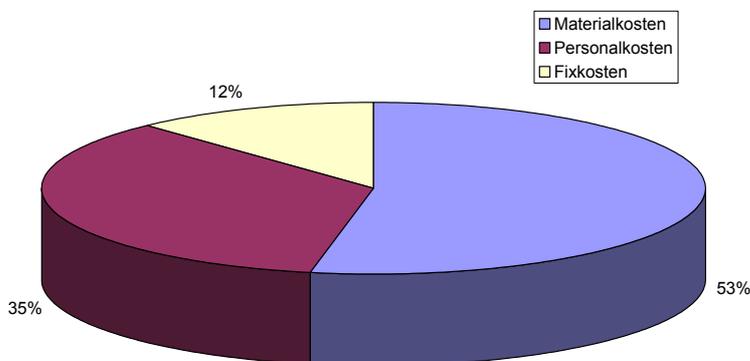


Abbildung 6-1: Kostenzusammensetzung beim Wasserglas – Flutungsverfahren
 Quelle: Sindermann, T., Flutungsverfahren, 2006, S. 41.

Beide Sanierungsverfahren sind gekennzeichnet durch eine starke Ähnlichkeit in der Vorgehensweise, dem Personaleinsatz und der erzielbaren Sanierungsleistung. Daher ist bei der mineralischen Sanierung ein gleich hoher Kostenansatz für alle Aufwendungen bis auf die Materialkosten gerechtfertigt. Die chemischen Lösungskomponenten des Wasserglas - Flutungsverfahrens kosten ca. 3.500 €/m³. Beim Einsatz einer Bentonit- Zementsuspension belaufen sich die Materialkosten auf ca. 200 €/m³ inklusive der Entsorgungskosten. Der durchschnittliche Materialverbrauch liegt bei beiden Verfahren in der Größenordnung des gesamten Leitungsvolumens. Da beim Wasserglas – Flutungsverfahren die Restmaterialmenge wiederverwendet werden kann, betragen die Materialkosten rund 1.600 €. Die Bentonit- Zementsuspension muss dagegen mit einer Gesamtverbrauchsmenge von 900 Litern in Rechnung gestellt werden, so dass hier Materialkosten von 180 € entstehen. Das Einsparpotenzial durch die wesentlich geringeren Materialkosten beträgt somit mehr als 1400 € pro GEA. Bezogen auf die Gesamtkosten ergibt sich ein Kostenvorteil von ca. 45 % (s. Abbildung 6-2).

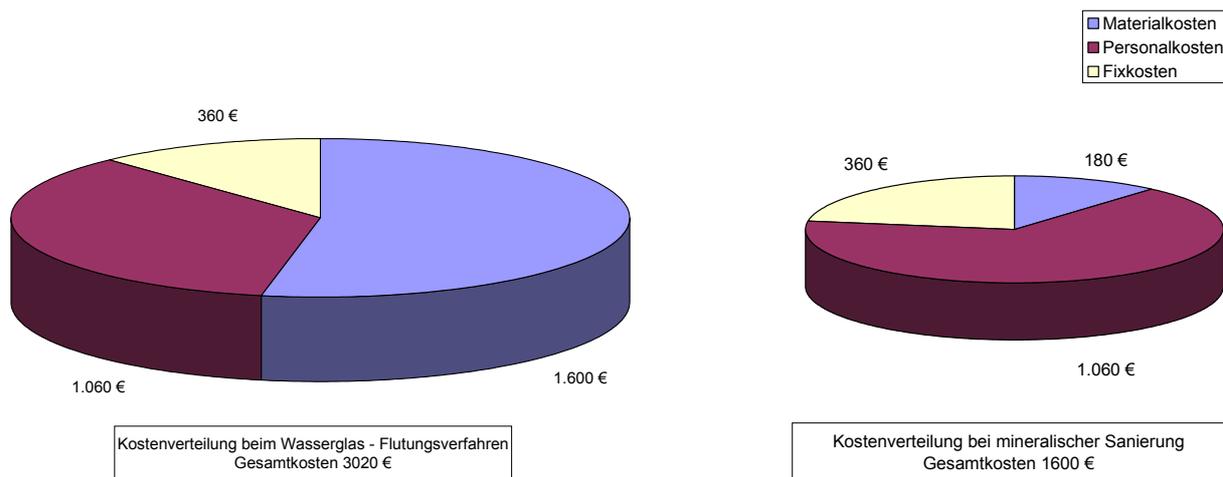


Abbildung 6-2: Kostenvergleich

Weiterhin ist der Verbrauch an Injektionsmitteln im Vorfeld einer Sanierung nur schwer abschätzbar und stellt im Falle hoher Materialkosten ein besonderes Kalkulationsrisiko dar. Aufgrund der geringen Kosten der mineralischen Injektionssuspensionen besteht für den privaten Netzbetreiber und das Sanierungsunternehmen eine gute Planungssicherheit bei der Kalkulation der Sanierungskosten.

Angesichts der umfangreichen Aufgabe einer flächendeckenden Sanierung von Grundleitungen im privaten, gewerblichen und öffentlichen Bereich ist eine abschließende in situ Erprobung und Erfolgskontrolle des neu entwickelten Sanierungsverfahrens dringend empfohlen.

7 Literatur

Dora, B.: [Baustoffe aus Betonbrechsand]: Hydraulisch erhärtende Baustoffe aus Betonbrechsand – Phasenveränderung durch Temperaturbehandlung und Einsatzmöglichkeit, Dissertation TU Braunschweig, 2001

Blask, O.: [Rheologie von Bindemittelleimen]: Zur Rheologie von Polymermodifizierten Bindemittelleimen und Mörtelsystemen, Dissertation Universität – Gesamthochschule Siegen, 2002

Gehm, L.: [Rheologie]: Rheologie – Praxisorientierte Grundlagen und Glossar, Hannover, Vincent Verlag, 1998

Kutzner, C.:[Injektionen im Baugrund]: Injektionen im Baugrund, Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 1991

Märten, A.:[Qualität ist kein Zufall]: Qualität ist kein Zufall, Firmeninformation: HDD Verfahren, Anneliese BUT, Ennigerloh, 2002

o. V.: [Flutungsverfahren]: Sanierungen an Grundstücksentwässerungsanlagen mit dem Flutungsverfahren, Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, 2006

o. V.: [Machbarkeitsstudie, Sanierung von Grundleitungsnetzen]: Machbarkeitsstudie zur Sanierung von Grundleitungsnetzen mit Injektionsmaterialien auf mineralischer Basis, Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, 2004

o. V.: [DIN 18130-1]: DIN 18130-1, Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes - Teil 1: Laborversuche, Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V., 1998

o. V.: [DIN EN 1610]: DIN EN 1610, Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und –kanälen, Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V., 1997

o. V.: [DIN EN 14117]: DIN EN 14117, Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Prüfverfahren - Bestimmung der Auslaufzeit von zementhaltigen Rissfüllstoffen, Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V., 2004

Schulze, B.: [Merkblatt Feinstbindemittel]: Merkblatt für Einpreßarbeiten mit Feinstbindemitteln in Lockergestein, Teil 1, Ernst & Sohn, Berlin, 2002

Sindermann, T.: [Flutungsverfahren] Sanierung von häuslichen Grundleitungsnetzen mit dem Flutungsverfahren– Untersuchungen zur Steigerung der Zuverlässigkeit und Effizienz, Dissertation RWTH Aachen, 2006

Stein, D.: [Kanalisationen]: Instandhaltung von Kanalisationen, 3. Aufl., Berlin: Ernst & Sohn, 1998